

正交各向异性材料粘塑性 损伤统一本构关系研究

大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室 周柏卓**

北京航空航天大学 聂景旭

沈阳航空发动机研究所 杨士杰

【摘要】 用损伤力学与粘塑性理论相结合的方法,将正交各向异性材料的粘塑性统一本构模型^[1]进行了修正和推广,建立了在蠕变与疲劳载荷交互作用下正交各向异性材料的粘塑性损伤统一本构模型。用该模型预测了 DD3 单晶合金的蠕变和疲劳特性以及蠕变和疲劳损伤,预测了在循环载荷作用下材料的蠕变与疲劳交互作用损伤及其寿命。同时将计算结果和试验结果进行了比较。

关键词: 正交各向异性 单晶 蠕变 疲劳 损伤

分类号: V 231.95

1 前 言

为确定火焰的低循环疲劳寿命, Walker K P 提出了一个各向同性材料的粘塑性统一本构模型^[2]。定向结晶和单晶材料是正交各向异性的, WALKER 模型不能直接应用于由这两种材料制成的构件。

文献[3, 4]通过引入一个正交各向异性的四阶张量,给出了正交各向异性材料的 WALKER 模型的修正公式。经过分析认为,这个公式在张量表达上和量纲上都是不正确的。所以这个修正公式也不能直接用于定向结晶材料和单晶材料。

材料的损伤通常是多种多样的,不同的物理过程(如塑性、蠕变和疲劳等)的损伤机理也不同。其微观的表现可能是不连续的、是具有方向性的空穴的成核、长大、聚合、晶界滑移、位错和微裂纹积聚等。损伤力学是把材料的损伤状态在宏观上看作是连续的,引入一些连续变化的、抽象的“损伤变量”来描述损伤。

损伤的微观机理决定了损伤是各向异性的。Lemaitre 和 Chaboche 曾用 36 个分量的四阶非对称张量定义了一个损伤张量,考虑了损伤的各向异性性质。但是,与损伤张量对应的有效应力张量也是不对称的,给工程应用带来不便。为便于工程应用,假设由材料微观结构的变化引起的损伤,可用一个连续的宏观标量损伤参数 D 来表示,即假设损伤是各向同性的。

2 正交各向异性材料粘塑性损伤统一本构模型

将正交各向异性材料的粘塑性统一本构模型^[1]进行了修正和推广,并引入一个损伤变量

D 。所提的正交各向异性材料的粘塑性损伤统一本构模型如下。

$$\dot{c}_{ij} = \left[\frac{\sqrt{\frac{2}{3}} (M_{ijkl} \sigma_{kl} - \Omega_{ij}) (M_{ijkl} \sigma_{kl} - \Omega_{ij})}{K (1 - D)} \right]^n \frac{(M_{ijkl} \sigma_{kl} - \Omega_{ij})}{\sqrt{\frac{2}{3}} (M_{ijkl} \sigma_{kl} - \Omega_{ij}) (M_{ijkl} \sigma_{kl} - \Omega_{ij})} \quad (1)$$

$$\dot{\Omega}_{ij} = (n_1 + n_2) \dot{c}_{ij} + \dot{c}_{ij} \frac{\partial n_1}{\partial \theta} \theta - (\Omega_{ij} - \dot{\Omega}_{ij} - n_1 \dot{c}_{ij}) \left(G - \frac{1}{n_2} \frac{\partial n_2}{\partial \theta} \theta \right) \quad (2)$$

$$K = K_1 - K_2 e^{-n_7 R} \quad (3)$$

$$\dot{c}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{e}_{ij} - \alpha_{ij} \dot{\theta} \quad (4)$$

$$G = (n_3 + n_4 e^{-n_5 R}) R + n_6 (M_{ijkl} \Omega_{ij} \Omega_{ij})^{(m-1)/2} \quad (5)$$

$$R = \frac{2}{3} \dot{c}_{ij} \dot{c}_{ij} \quad (6)$$

$$dD = dD_c + dD_f \quad (7)$$

式中: c_{ij} 为非弹性应变分量; e_{ij} 为弹性应变分量; ϵ_{ij} 为总应变分量; σ_{ij} 为应力分量; Ω_{ij} 为平衡应力分量; M_{ijkl} 为正交各向异性张量的分量^[1]; θ 为温度; α_{ij} 为材料的线膨胀系数, 当 $i \neq j$ 时, $\alpha_{ij} = 0$, α_{11} , α_{22} 和 α_{33} 分别为 3 个材料主轴方向的线膨胀系数; Ω , n , m , n_1 , n_2 , n_3 , n_4 , n_5 , n_6 , n_7 , K_1 和 K_2 为与温度相关的材料常数; D 为损伤参数; D_c 为蠕变损伤变量; D_f 为疲劳损伤变量。

3 损伤及其演化规律

对于固定载荷或缓慢变化的载荷, 采用由 Lemaitre 和 Chaboche 修正的 Kachanov 蠕变损伤模型描述蠕变损伤。

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} = \left[\frac{\sigma}{A (1 - D)} \right]^r (1 - D)^{r-k} = \frac{1}{(1 - D)^k} \left(\frac{\sigma}{A} \right)^r \quad (8)$$

采用 Chaboche 疲劳损伤模型描述疲劳损伤。

$$\dot{D}_f = \frac{dD_f}{dt} = [1 - (1 - D)^{1+\beta}]^\alpha \left[\frac{\Delta \sigma}{M (1 - D)} \right]^\beta \quad (9)$$

式中: α , β 和 M 是材料参数。

式(8)和式(9)分别给出了非线性累积的蠕变损伤模型和 Chaboche 疲劳损伤模型, 假设蠕变与疲劳交互作用的损伤增量是两种损伤增量的线性叠加。即:

$$dD = dD_c + dD_f = \frac{1}{(1 - D)^k} \left(\frac{\sigma}{A} \right)^r dt + [1 - (1 - D)^{1+\beta}]^\alpha \left[\frac{\Delta \sigma}{M (1 - D)} \right]^\beta dN \quad (10)$$

4 损伤寿命预测及其试验验证

将以上的粘塑性损伤统一本构模型集成到了 MARC 有限元程序, 并对 DD3 单晶材料的蠕变、疲劳及蠕变和疲劳交互作用的损伤及寿命进行了预测。

图 1 表示试件的取向为 [001] 及 [011] 方向, 温度为 950°C, 载荷分别为 250 MPa 和 350 MPa 时的蠕变应变的预测值和试验值。

图 2 表示试件的取向为 [001] 及 [011] 方向, 温度为 950°C, 载荷分别为 250 MPa 和 350 MPa 时的蠕变损伤。

在循环载荷的作用下, 蠕变损伤和疲劳损伤是相互耦合的。当循环载荷的周期很短时, 以

疲劳损伤为主。随着循环载荷周期的增长,蠕变损伤的影响逐渐增强。图 3 表示试件的取向为 [001], 温度为 980℃, 循环应力范围 $\Delta\sigma$ 为 820 MPa, 循环载荷的周期分别为 3 s, 100 s, 300 s 和 600 s 时的蠕变和疲劳交互作用损伤。

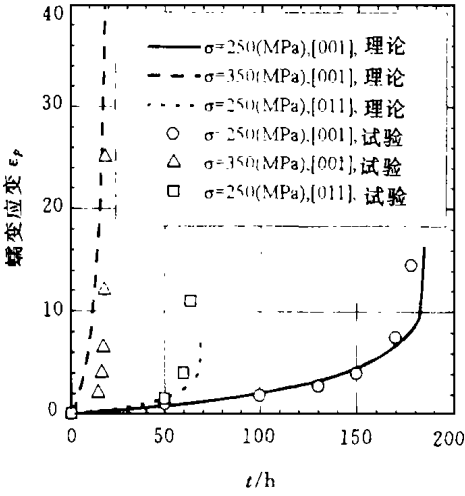


图 1 蠕变应变与载荷、方向、时间的关系

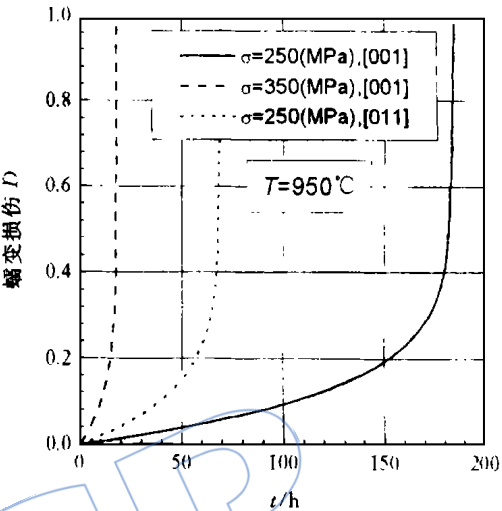


图 2 蠕变损伤与载荷、方向、时间的关系

为了将所建立的各向异性粘塑性统一本构模型和损伤统一本构模型及相应的计算方法在工程中推广应用, 设计了模拟气膜冷却的空心涡轮叶片的子构件。进行了在蠕变与疲劳载荷作用下构件的损伤试验和寿命试验。

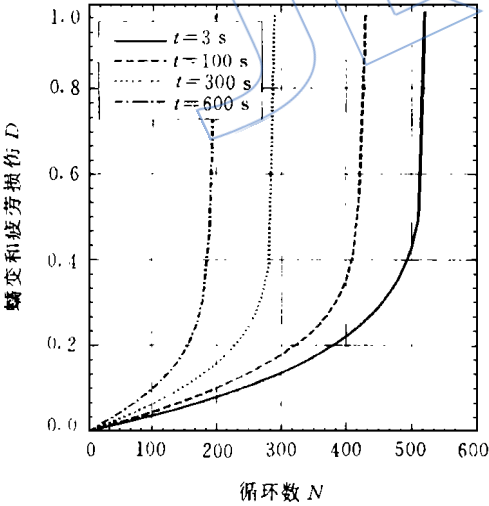


图 3 损伤与周期、循环数的关系

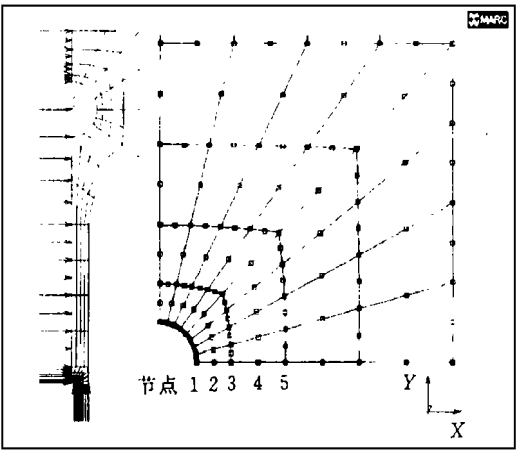


图 4 有限元网格

用所提出的粘塑性损伤统一本构模型对试验件在试验载荷作用下的应力应变场及损伤进行了有限元分析。由于对称性, 取试件的 1/4 为研究对象。坐标系的原点取在小孔的中心, 坐标系及试件的有限元模型如图 4 所示。在 X 对称轴上, 约束节点的 Y 方向位移; 在 Y 对称轴

上,约束节点的 X 方向位移。在加载端孔的中心施加集中载荷,集中载荷通过刚性连杆传递到上半孔边的节点上(见图 4)。

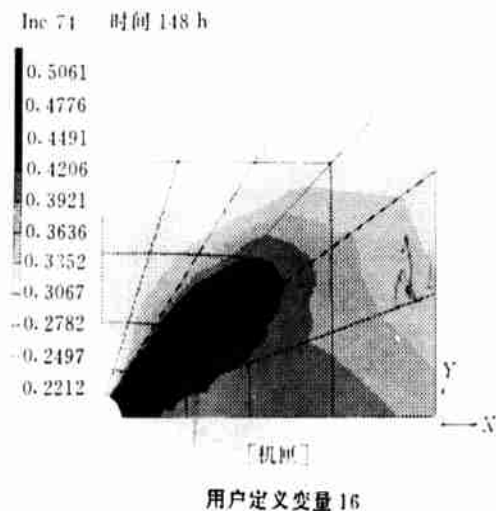


图 5 148 小时时刻的损伤分布

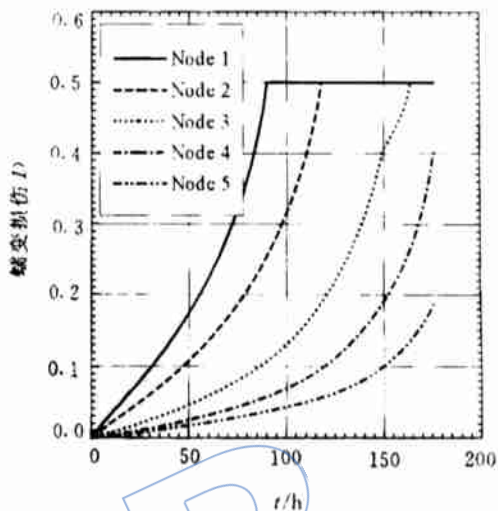


图 6 节点 1~5 的损伤随时间的变化关系

在固定载荷 $P = 2500 \text{ N}$ 作用下,在 148 小时时刻的损伤分布如图 5 所示。节点 1~5 的损伤随时间的变化关系如图 6 所示。

5 结 论

- (1) 用所提出的正交各向异性材料的粘塑性损伤本构模型能较精确预测单晶及定向结晶高温合金构件的蠕变、疲劳和蠕变与疲劳交互作用下的力学行为及其寿命。
- (2) 用所提出的本构模型可较精确描述蠕变行为的第二和第三阶段。
- (3) 改变各向异性矩阵的系数,所提出的本构模型可分别描述定向结晶材料、单晶材料以及各向同性材料的粘塑性及损伤行为。

参 考 文 献

- 1 周柏卓,张晓霞 正交各向异性材料粘塑性统一本构模型 推进技术, 1998, (1):
- 2 Kevin P W. Research and Development Program for Nonlinear Structural Modeling with Advanced Time- Temperature Dependent Constitutive Relationship. NASA - CR - 165533
- 3 Swanson G A. Life Prediction and Constitutive Models for Engine Hot Section Anisotropic Materials. NASA - CR - 174952
- 4 Swanson G A. Life Prediction and Constitutive Models for Engine Hot Section Anisotropic Materials. NASA - CR - 179594
- 5 工程材料实用手册(第二分册). 北京: 中国标准出版社, 1989: 868- 88

(责任编辑 王震华)

of the fractional dimension of time-serial vs the parameter is obtained, which can identify critical bifurcated parameters of nonlinear dynamical system quite well

Key Words Rotor system Bifurcation Parameters Recognition

BIFURCATIONS OF NONLINEAR ROTOR-SFD SUPPORTING SYSTEM

Zhao Yonghui and Zou Jingxiang

(Dept. of Astronautics and Mechanics of Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

ABSTRACT Periodic solutions of nonlinear rotor-SFD supporting system are calculated by using Newton-Fox shooting method and pseudo-arc length continuation procedure. According to multi-variable Floquet theory, bifurcations and stability of the system are analyzed. Bifurcation diagrams of the system are obtained from on Poincaré map. The results show that the motion of the rotor system undergoes nonlinear dynamics phenomena, such as period doubling bifurcation, tangent bifurcation and so on.

Key Words Rotor system Shooting method Bifurcation Stability

RESEARCH ON UNIFIED VISCOPLASTIC DAMAGE RELATIONSHIP OF ANISOTROPIC MATERIALS

Zhou Baizhuo

(State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment
Dalian University of Technology, Dalian 116023)

Yang Shijie

(Aeroengine Research Institute, Shengyang 110015)

Nie Jingxu

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT With the help of combining continuum damage mechanics and viscoplastic theory, the unified viscoplastic constitutive model^[1] developed by authors is modified. A unified viscoplastic constitutive damage model of anisotropic materials under the alternative effect of creep and fatigue load is established. The creep and fatigue property as well as their damages for monocrystalline alloys DD3 have been predicted according to this model. The durability and damage under the alternative effect of the creep and fatigue load for the material under cyclic loading. The predicted results are compared with test data.

Key Words Anisotropic material Monocrystal Creep Fatigue Damage

AN EXPERIMENTAL STUDY ON LOW CYCLE FATIGUE LIFE OF 1ST TURBINE DISK IN AEROENGINE

Gong Mengxian, Huang Qingdong, Xiao Yuxiang

Gu Yuanxing, Zhao Xingning, Cao Fenglan

(Gas Turbine Establishment 610500)

ABSTRACT According to the standard load cycle spectrum, a stress analysis of 1st turbine disk in an aeroengine was completed to determine its useful life. The places, where the centre hole came across the pin holes, were the dangerous points (so called check