

高温蠕变分析的非线性连续损伤力学模型^{*}

荆建平¹, 夏松波¹, 孙 毅², 冯国泰¹

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 航天工程与力学系, 黑龙江, 哈尔滨 150001)

摘 要: 采用非线性连续损伤力学模型对某发动机涡轮轮盘在典型任务工况下的蠕变损伤和寿命进行分析, 并同当前普遍使用的累积损伤理论进行比较, 指出了累积损伤理论存在的问题。分析结果表明, 连续损伤模型能更合理地描述材料蠕变损伤的累积发展过程。

关键词: 航空发动机; 涡轮盘; 蠕变; 损伤

中图分类号: V235.11

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2001) 02-0139-04

Nonlinear continuum damage mechanics model on high temperature creep analysis

JING Jian-ping¹, XIA Song-bo¹, SUN Yi², FENG Guo-tai¹

(1. Schools of Energy Science and Engineering, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China;

2. Dept. of Astronautics and Mechanics, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A nonlinear Continuum Damage Mechanics model was employed to analyze the creep life and damage of a gas turbine disc of an engine under typical flight, then, the results were compared with those from present linear damage cumulating theory. The results prove that Continuum Damage Mechanics model can describe the cumulation and development of damage more accurately.

Key words: Aircraft engine; Turbine wheel; Creep; Injury

1 引 言

现代航空工业的发展要求其各部件要承受更高的温度和更大的工作载荷。目前对航空材料的蠕变损伤的分析, 普遍采用累积损伤理论, 因忽略了复杂应力状态对材料蠕变损伤的影响, 损伤的累积处理方法也较为粗糙, 所以分析结果往往与实际有较大偏差。近三十年来发展起来的损伤力学, 能系统地讨论微观缺陷材料的机械性能、结构应力分布的影响以及缺陷的演化规律, 可用于分析微裂纹的演化、宏观裂纹形成直至构件破坏的全过程^[1]。

发动机轮盘在高温、高转速下工作, 容易产生蠕变损伤。本文利用某发动机涡轮轮盘在典型任务下应力场的瞬态热弹塑性分析结果, 采用连续损伤力学模型分析发动机涡轮轮盘的蠕变损伤, 并同累积损伤理论所得结果进行了比较, 得出了有益的

结论。

2 理 论

2.1 累积损伤理论

累积损伤理论认为蠕变损伤是线性叠加的, 当损伤值达到 1 时, 构件发生破坏。

$$N \cdot \Delta t / t_r = 1 \quad (1)$$

式中 $\Delta t / t_r$ 为每次的蠕变损伤; t_r 为蠕变寿命; 这就是蠕变预测时采用的线性损伤累积法。

其中, 蠕变断裂寿命 t_r 由下式求得

$$t_r = \left| \sigma_{eq} / A \right|^B \quad (2)$$

式中 A, B 为材料常数。

线性累积损伤定律假设: (1) 对于每一应力水平, 不论在寿命的前期或后期, 每次的蠕变损伤相同; (2) 无论是由高到低或由低到高, 加载顺序的变化不影响寿命。

* 收稿日期: 2000-07-03; 修订日期: 2000-09-26。基金项目: 国家重点基础研究专项经费资助项目 (G1998020321)。

作者简介: 荆建平 (1969—), 男, 博士生, 研究领域为大型旋转机械的强度和振动。

2.2 连续介质损伤力学理论

Lemaitre 提出以下多轴蠕变损伤模型^[1~4]:

$$D=1-\left|1-R_V(1+\alpha)\right|\left|\frac{\sigma_{eq}}{\lambda}\right|^r\left|t\right|^{\frac{1}{1+\alpha}}\tag{3}$$

其中 α, λ, r 为材料常数。

式中三轴因子

$$R_V=\frac{2}{3}(1+u+3(1-2u)\left|\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}}\right|^2)\tag{4}$$

其中 $\sigma_{eq}=\left|\frac{3}{2}S_{ij}S_{ij}\right|^{1/2}; S_{ij}=\sigma_{ij}-\sigma_H\delta_{ij}; \sigma_H=\frac{1}{3}\sigma_{kk};$
 u 为泊松比。

单轴情况下 $R_V=1$ 时

$$D=1-\left|1-(1+\alpha)\right|\left|\frac{\sigma_{eq}}{\lambda}\right|^r\left|t\right|^{\frac{1}{1+\alpha}}\tag{5}$$

令 $t=t_R, D=1$ 时, 则有

$$t_r=\frac{1}{R_V(\alpha+1)}\left|\frac{\sigma_{eq}}{\lambda}\right|^{-r}\tag{6}$$

单轴情况下 $R_V=1$ 时

$$t_r=\frac{1}{\alpha+1}\left|\frac{\sigma_{eq}}{\lambda}\right|^{-r}\tag{7}$$

蠕变损伤模型一般式为

$$D=1-\left|1-t/t_r\right|^{\frac{1}{1+\alpha}}\tag{8}$$

上述损伤模型中的三个材料常数 α, λ, r 可由应力保持不变的单轴拉伸蠕变试验求得。将试验测得的单轴蠕变寿命关系式(2)与式(7)联立可得到 $r=-B$ 以及

$$A^{-B}=1/(1+\alpha)\lambda^{-B}\tag{9}$$

由测得的蠕变第二阶段和蠕变第三阶段的应变速率 $\dot{\epsilon}_p$ 后, 蠕变第三阶段任意时刻的损伤值

$$D=1-\left|\dot{\epsilon}_p^*/\dot{\epsilon}_p\right|^{1/n}\tag{10}$$

其中 n 为与温度有关的材料常数。

由损伤值和测得的 t_r 可由式(8)拟合出 α 。进而将 α 代入式(9) 求出 λ 。

3 某发动机涡轮轮盘应力场的有限元分析

发动机涡轮轮盘第一级附近在工作过程中往往温度较高, 温度梯度较大, 由此会产生较大的工作应力, 因此蠕变水平也较高。采用 ADINA 大型通用有限元程序, 根据发动机典型的工作工况^[2], 包括起飞、爬升、典型飞行、下滑和着陆等飞行任务, 对发动机危险区域进行了瞬态温度场及热弹塑性分析。轮盘的各物性参数均为时间和温度的函数, 其有限元网格见图 1, 典型飞行时的应力场见图 2。分

析结果表明: 轮盘未进入塑性。危险点的温度、应力值以及三轴因子见表 1。该轮盘材料为 ZbNCT25, 其熔点为 1 364 ℃^[3]。

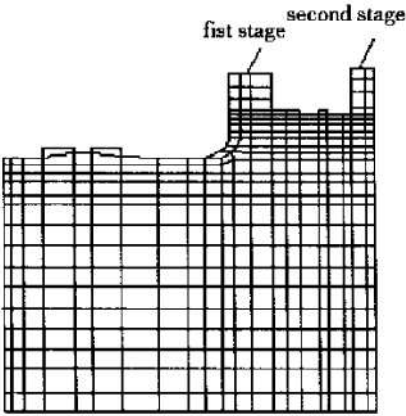


Fig. 1 Finite element mesh of turbine disc

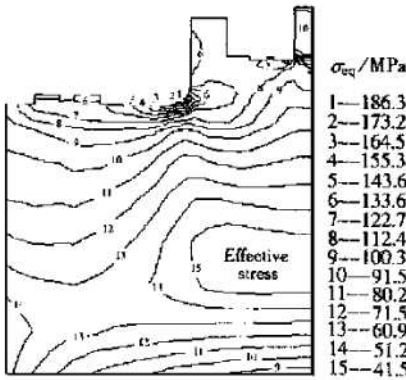


Fig. 2 Effective stress field of turbine disc under typical flight

Table 1 Effective stress, temperature and triaxial coefficients at dangerous points

Dangerous points	σ /MPa	t /℃	R_V
Root of first disc	186.3	643.2	1.51
Root of second disc	175.7	630.6	1.41

4 损伤、寿命分析及模型比较

由轮盘材料 ZbNCT25 的 650 ℃ 下单轴蠕变试验结果^[3], 分别得到蠕变寿命和多轴连续损伤模型寿命预测式:

$$t_r=\left|\frac{\sigma_{eq}}{626.84}\right|^{-8.569}\tag{11}$$

$$t_r=\frac{1}{R_V7.03}\left|\frac{\sigma_{eq}}{787.2}\right|^{-8.569}\tag{12}$$

单轴情况下 $R_V=1$ 时

$$t_r = \frac{1}{7.03} \left| \frac{\sigma_{eq}}{787.2} \right|^{-8.569} \tag{13}$$

以及蠕变损伤演化模型

$$D = 1 - \left| 1 - \frac{t}{t_r} \right|^{0.1423} \tag{14}$$

由文献[3]的单轴拉伸蠕变试验结果和式(10)可得到材料的实际损伤值,并与单轴连续损伤演变规律进行了比较(如图3),可见蠕变连续损伤模型与实际吻合较好。

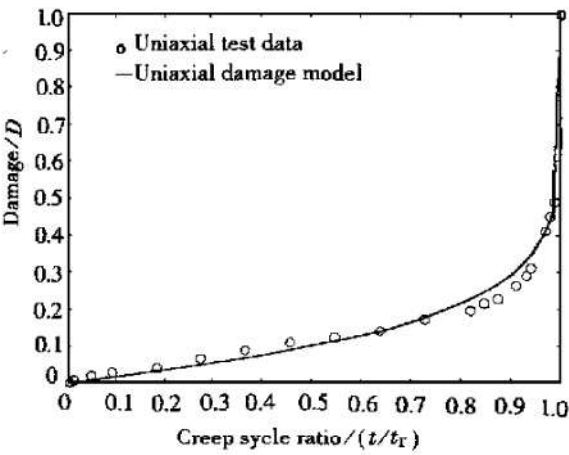


Fig. 3 Creep damage evolution of ZbNCT25 at 650 °C and σ= 422MPa

根据表1中的各危险点的应力值,分别采用累积损伤理论蠕变寿命预测式(11)和单轴、多轴连续损伤力学模型式(12)和式(13)估算发动机涡轮各危险点的蠕变致裂寿命,其结果见表2。

Table 2 Creep fatigue life at dangerous points			
Dangerous points	Traditional life prediction equation	Uniaxial continuum damage model	Multiaxial continuum damage model
Root of first disc	32 763	32 819	21 734
Root of second disc	54 201	54 137	38 395

从寿命结果可以看出,采用累积损伤理论蠕变寿命预测公式与单轴的连续损伤模型估算出的寿命是基本一致的,而与采用多轴连续损伤模型预测的寿命结果则相差很大。这反映出累积损伤理论蠕变寿命预测公式无法有效解决多轴复杂应力问题,而多轴连续损伤模型引进了三轴度因子 R_v ,考虑了第一应力不变量的作用,反映了复杂应力状态对材料蠕变损伤的影响,由于模型中的材料常数均可由单轴下的蠕变试验获得,因此多轴连续损伤模型利用单轴蠕变试验结果把问题推广到多轴,更准确地描述了材料的损伤^[4-6]。

不难发现三轴因子即多轴应力状态对寿命估算结果影响非常大,轮盘内各点的三轴因子可由相应各点的6个应力分量根据式(4)求得,图4给出了对应于图2应力场下的三轴度因子在涡轮轮盘内部的分布。分析结果表明,由于累积损伤理论蠕变寿命预测公式没有考虑多轴复杂应力状态的影响,过高估计了轮盘的蠕变寿命,在理论分析上还有较大剩余寿命时,事实上裂纹已经萌生,这对于飞行是非常危险的。

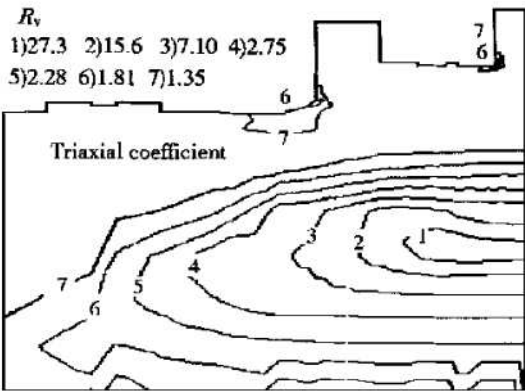


Fig. 4 Distribution of triaxial coefficient (R_v) of turbine disc

进一步考察损伤的累积情况,分别采用线性累积式(1)和单轴连续损伤演变规律式(13)和式(14),计算出第一级叶轮根部损伤的累积过程,如图5所示。从图中可以看出,连续损伤模型所描述的损伤演变规律,是一个非线性的累积过程,这与轮盘材料的实际损伤发展过程相符,而线性累积则将每次产生的蠕变损伤简单相加,没有正确地反映损伤的累积过程,从图中可以看出,线性累积高估了材料的蠕变损伤。

采用多轴损伤模型,计算出第一级叶轮根部损伤的累积过程,并与单轴损伤模型的结果进行比较,由图6

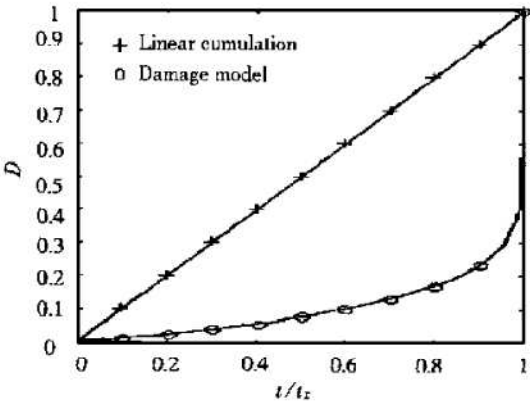


Fig. 5 Compare of linear damage accumulation and uniaxial nonlinear damage developing

可以看出:多轴损伤模型下的损伤发展比单轴损伤模型下的损伤发展大大加快,这表明多轴复杂应力状态加速了蠕变损伤的累积,并缩短了材料的蠕变断裂寿命。

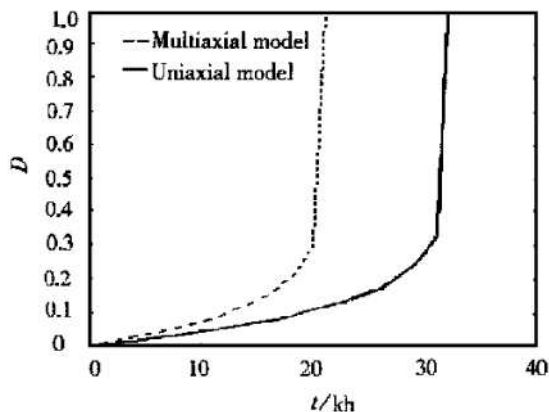


Fig. 6 Compare of damage developments of multi-axis and uniaxial axis

5 结 论

(1) 由于累积损伤理论没有考虑多轴应力的影响,在寿命预测时,高估了蠕变寿命。

(2) 非线性连续损伤模型,更准确地反映了轮盘材料的非线性损伤累积发展过程;多轴复杂应力大大缩短了轮盘材料的蠕变寿命,加速了损伤的累积过程,因此在蠕变损伤分析中,必须考虑多轴应力的影响。

(3) 非线性连续损伤模型,既准确地反映了材料蠕变损伤的累积过程,又考虑了多轴复杂应力的影响,分析结果更接近实际;而线性累积理论高估了材料的蠕变损伤。

参考文献:

- [1] 余天庆,钱济成. 损伤理论及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1993.
- [2] Troha w, Stabrylla R. Effect of aircraft power usage on turbine engine relative durability and life[R]. AIAA 80-1115.
- [3] 工程材料实用手册编辑委员会. 工程材料实用手册(2)[M]. 北京:中国标准出版社,1989.
- [4] Lemaitre J. Application of damage concepts to predict creep fatigue failures[J]. Transaction of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology. 1979, 101: 284~ 292.
- [5] Lemaitre J. How to use damage mechanics[J]. Nuclear Engineering and Design, 1984, 80: 233~ 245.
- [6] Chaboche J L. Continuum damage mechanics: Part 2[J]. Transaction of the ASME. Journal of Applied Mechanics. 1988. 55(1): 65~ 72.

(编辑:盛汉泉)

简 讯

1999 年《EI》收录中国科技论文数排名前 20 位的期刊

据中国科学技术信息研究所出版的《1999 年度中国科技论文统计与分析》一书公布,《推进技术》在 1999 年《EI》(美国工程索引)收录中国科技论文数较多的 100 种期刊中名列第六,以下为 1999 年《EI》收录论文数量排名前 20 名的期刊。

1. 清华大学学报; 2. 电子学报; 3. 光学学报; 4. 北京航空航天大学学报; 5. 软件学报; 6. 推进技术; 7. International Conference on Signal; 8. 功能材料 Processing Proceedings; 9. 西安交通大学学报; 10. Transactions of Nonferrous Metals Society of China(英文版); 11. 钢铁; 12. Proceedings. of SPIE—The International Society for Optical Engineering; 13. 中国激光; 14. 半导体学报; 15. 光电子激光; 16. 强激光与粒子束; 17. 光学技术; 18. 核动力工程; 19. 自动化学报; 20. 化工学报。

(本刊通讯员)