

涡轮盘榫槽的损伤力学研究

北京航空航天大学 杨 慧* 张 锦 聂景旭 侯贵仓

【摘要】 本文运用损伤力学方法对涡轮盘试件榫槽在蠕变和疲劳交互作用下的裂纹起始寿命与裂纹扩展寿命进行了分析研究。榫槽的非线性损伤累积模型是由修正的 Chaboche 低循环疲劳损伤模型和改进的 Kachanov 蠕变损伤模型综合形成的。在此基础上建立了疲劳和蠕变交互作用下裂纹扩展计算模型。从理论分析计算与试验结果的一致性,说明所建模型的正确性。采用损伤有限元素法,以有限元网格尺寸模拟损伤裂纹长度。从试件榫槽的裂纹扩展计算分析中,提出裂纹起始方向和裂纹扩展方向判断准则,并通过计算检验了此准则的正确性。文中所建立的基本理论,计算方法及结果分析在工程实际中具有一定使用价值。

主题词: 涡轮 疲劳 蠕变 裂纹扩展 损伤力学

分类号: V 231. 95

1 概 述

传统的疲劳寿命预测方法主要是讨论初始寿命,裂纹扩展则按断裂力学的方法处理。诸多研究表明,裂纹起始阶段微裂纹的萌生及扩展对整个裂纹扩展寿命有着不可忽视的影响,且微裂纹的扩展规律与宏观裂纹扩展规律完全不同,因此即使把后一段寿命计算很准确,仍难于准确得出结构的全寿命。且材料的失效模式不仅仅是疲劳断裂,还包括蠕变、磨损、热疲劳等,用断裂力学已无法描述。损伤力学改变了这一状况,它以不可逆热力学和凸函数理论为理论依据,用宏观变量描述微观变化的方法,不仅可以研究多种失效模式的叠加问题,而且将疲劳和断裂统一在一个模型中,从而减少了确定材料常数所需要的试验工作,节省试验费用,降低研究成本。因此损伤力学方法的研究已得到国内外学者的广泛重视。对于结构的低周疲劳/蠕变交互作用下寿命的预测,传统的方法考虑蠕变效应不是太粗略(例如 10% 规律法),就是需要大量试验(例如 SEP 法^[1]),而损伤力学方法则以损伤变量 D 的形式将蠕变效应与疲劳效应统一起来。所以损伤力学为解决传统断裂力学所难以解决的问题提供一种先进的研究手段。本文将低周疲劳/蠕变交互作用下的非线性损伤力学模型^[2]应用于涡轮盘试件榫槽的起始寿命及裂纹扩展寿命分析中。计算分析结果与试验值相当吻合。

2 损伤力学分析模型与裂纹扩展计算模型的建立

2.1 疲劳/蠕变交互作用损伤模型

描述单轴蠕变损伤破坏行为状态变量理论的最简单形式为 Kachanov 损伤理论,它假设损伤参数 D 为本构关系的单个状态变量,Le Maître^[3]和 Chaboche^[4]又将其演化方程修正为:

$$\frac{dD_c}{dt} = f_c = \left(\frac{\sigma}{A} \right)^r (1 - D_c)^{-k} \quad (1)$$

其中损伤参数 D_c 为单纯蠕变损伤, 是材料蠕变时对损伤面积所占比例的度量, A, r, k 是与温度有关的材料常数, 由蠕变试验确定, f_c 为非线性蠕变损伤函数。

采用应力控制条件的 Chaboche 疲劳损伤模型适用于计算高、低周疲劳损伤。考虑应力比 R 的影响, 文献[2]给出只适用于低周疲劳的 Chaboche 疲劳损伤模型修正形式为:

$$\frac{dD_F}{dN} = f_F = \left(\frac{1-R}{2} \right)^{-\gamma} [1 - (1 - D_F)^{1+\beta}]^{\alpha} \left[\frac{S_a}{M(\bar{S})(1 - D_F)} \right]^{\beta} \quad (2)$$

作为一种近似, 采用叠加规律分析蠕变和疲劳的交互作用。在累积损伤计算中, 交互作用下的损伤增量表示为两种损伤增量的线性叠加。

设交互作用下的损伤为 D , 则以损伤增量形式表达损伤体的本构方程为:

$$dD = dD_c + dD_F = f_c dt + f_F dN \quad (3)$$

(3) 式则反映了累积的非线性本质。对于周期为 Δt 的方形波, 将(1)式代入(3)中, 得:

$$\frac{dD}{dN} = \int \left(\frac{\sigma}{A} \right)^r \frac{(1-D)^{-k}}{dt} + \left(\frac{1-R}{2} \right)^{-\gamma} [1 - (1-D)^{1+\beta}]^{\alpha} \left[\frac{S_a}{M(1-D)} \right]^{\beta} \quad (4)$$

设蠕变与疲劳交互作用下的破坏寿命为 N_{FC} , 取 $N = 0 \sim N_{FC}, D = 0 \sim 1$, 再积分(4)式, 得:

$$N_{FC} = \int \frac{dD}{\frac{(1-D)^{-k}}{N_c(k+1)} + \frac{[1 - (1-D)^{1+\beta}]^{\alpha}}{N_F(1-\alpha)(1+\beta)(1-D)^{\beta}}} \quad (5)$$

式中:

$$N_c = \left[(k+1) \int \left(\frac{\sigma}{A} \right)^r dt \right]^{-1}$$

$$N_F = \left(\frac{1-R}{2} \right)^{-\gamma} [(1-\alpha)(1+\beta)]^{-1} \left[\frac{S_a}{M(\bar{S})} \right]^{-\beta}$$

式中: N_c 为单独蠕变损伤作用下的破坏寿命, N_F 为单独低疲劳损伤作用下的破坏寿命。

2.2 裂纹扩展的计算模型

本文给出的疲劳/蠕变交互作用下的裂纹扩展模型是 Dugdale 蠕变裂纹扩展模型^[5]的推广。这种方法将裂尖塑性区视为即将破坏的小断裂区。利用损伤方程计算小断裂区破坏的时间, 再用 Dugdale 模型计算其长度, 从而计算出裂纹扩展速率。

在恒载荷情况下, 考虑平面应力状态受拉的一个中心裂纹。设裂纹长度是 $2l$, 在裂纹尖端伴随有瞬时塑性应变。因此可以假设裂纹尖端应力以屈服应力 σ_y 为限(即理想塑性)。这样裂纹中间部分两边自由, 裂纹尖端应力为 σ_y , 其中 K 为应力强度因子。有如下关系:

$$K \cdot \sqrt{\pi l} - 2\sigma_y \cos^{-1} \left(1 - \frac{a}{l} \right) = 0 \quad (6)$$

在无限大板的情况下, $K = \sqrt{\pi l} \cdot P$, (P 为无限远处均布载荷), 有:

$$\frac{a}{l} = 1 - \cos \left(\frac{\pi l}{2\sigma_y} \right) = c \quad (7)$$

于是裂尖小断裂区长度 $a = c l$ 用(1)式的损伤演化方程描述尖端区的损伤量, dD/dt 和断裂发生的时间间隔 t_c :

$$dD/dt = (\sigma_y/A)^r (1-D)^{-k} \quad (8)$$

$$t_c = (k+1)^{-1} (\sigma_y/A)^{1/r} \quad (9)$$

当小断裂区破坏时裂纹长度增加 $2a$, 这时又产生另一小断裂区, 裂纹扩展这样连续进行

下去。裂纹以相等的时间段逐步扩展时,小断裂区长度 a 也随之增加,表示裂纹扩展速率随之增大。对于其他形式的裂纹,也可以用同样的概念,计算理想塑性下的塑性区,再利用损伤力学模型计算裂纹的扩展。

将上述模型应用于疲劳/蠕变交互作用下的裂纹扩展计算时,作了如下改进:(1)将小断裂区取为裂尖反向屈服区,在反向屈服区内使用疲劳蠕变交互作用下损伤寿命计算公式(5)计算小断裂区的破坏寿命。(2)在小断裂区外只考虑损伤累积效应,用(3)式计算损伤累积。这种作法可使计算精度得到提高。

3 损伤有限元

用损伤力学方法研究构件的疲劳断裂寿命问题时,可考虑全面而细致的因素,分析结果也准确可靠,但同时增加了分析的复杂性。国内外学者积极寻求其与近代计算技术相结合的途径。本文以涡轮盘试件榫槽裂纹扩展计算的非线性损伤累积模型,通过损伤有限元计算所得到的试件裂纹扩展寿命与试验结果吻合,并导出裂纹扩展方向判断的准则等规律,向工程应用方面推进一步。采用损伤有限元法需解决如下问题:

3.1 元素的失效准则

采用四节点等参元进行涡轮盘榫槽损伤有限元分析,并按元素积分点的当量应力计算元素损伤量。在裂纹尖端,当元素完全进入反向屈服时,4个积分点的最大应力及每个积分点的应力差均相等。否则,4个积分点的当量应力不相同。在这种情况下可采用3种准则计算元素损伤失效寿命或累积损伤。即平均应力准则,最大应力准则及综合准则,由文献[2]分析可知用网格模拟裂纹扩展寿命计算时,在高保载时间下(以蠕变为主),最大应力失效准则误差最小,仅为6%,故本文在损伤分析时选取最大应力失效准则。

3.2 裂纹扩展的模拟

计算给定载荷下涡轮盘试件榫齿的裂纹尖端应力场后,利用相应的损伤模型计算裂纹尖端前单元损伤破坏所需要的循环数,计算在此循环数下未破坏单元的累积损伤值;将裂纹延长至损伤破坏的单元处,重新计算裂纹尖端前部的应力场。再计算下一个元素损伤破坏的循环数(考虑损伤累积),同时计算未破坏单元的累积损伤。记录循环数与裂纹扩展长度,重复上述步骤,直至断裂,从而得到裂纹扩展寿命。

计算裂纹尖端前的应力场时,可采用三种方式模拟裂纹。即损伤模拟裂纹,用节点约束或约束方程来模拟裂纹,及以有限元网格中的单元模拟裂纹,如图1所示。这种方法便于考虑损伤效应,在未能预知裂纹扩展方向的情况下,用此方式,以元素的不断“死亡”预示裂纹的扩展,是一种精度高,易于工程应用的裂纹模拟方式。它的缺点是网格必须划分得很密,使单元尺寸小于裂尖反向屈服区尺寸,才能保证计算精度高,这会使计算工作量大大增加。本文采用单元模拟裂纹的方式,最小的单元尺寸取为0.1 mm。

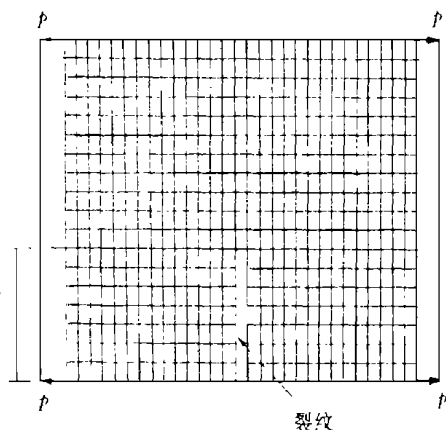


图1 单元模拟裂纹示意图

3.3 裂纹萌生及裂纹扩展方向判断^[6]

在计算涡轮盘试件榫槽的起始寿命时,因结构的复杂性导致计算的局部区域中出现多应力集中区^[6],经过本文所设计损伤分析程序的计算,可知达到临界损伤值的单元有多个并分布在多个并分布在多个危险点中,作为一种近似,即把临界损伤单元最多的危险区域作为裂纹萌生区,裂纹扩展寿命计算也就针对此危险区域进行之。

由前述损伤力学分析可知,以应力描述构件的损伤场,在实际结构的裂纹扩展计算时,由于元素的累积损伤和因裂纹扩展而引起结构的应力重新分布,此双重因素的作用,使得裂纹前方几个单元可能同时达到临界损伤,故判断损伤的单元也就是判断裂纹扩展的方向。单元损伤值与单元应力水平是相关的,因此选取载荷峰值时,以弹塑性应力值最高的损伤区外围单元所在的方向为裂纹扩展方向。在本文榫槽的四节点等参元弹塑性应力分析中,以元素积分点应力衡量元素应力水平,即按 4 个积分点当量应力平均值确定元素应力水平,预估裂纹扩展方向。

4 计算结果及分析

此带榫槽涡轮盘试件曾进行过损伤试验。涡轮盘的榫槽形状是模拟某研制型发动机真实涡轮盘设计的。试件为 GH4169 材料的等厚盘,厚度为 10 mm,盘内孔半径为 20 mm,盘外缘半径为 102 mm,周向均布 12 个榫槽,每榫槽由 3 对齿组成,槽底宽 5 mm,深 1.5 mm,槽底至盘心为 82.5 mm。在菲力轮上进行试验。载荷由液压加载控制系统通过拉杆作用于对称的一对榫槽上。试验过程中榫槽温度控制在 $650 \pm 10^\circ\text{C}$ 。

计算涡轮盘试件榫槽在梯形载荷波作用下的弹塑性应力分析。试件榫槽应力分析分两步进行,根据构件受载的对称性及几何对称性,选取轮盘 1/4 扇形区先进行线弹性应力分析,以此分析结果确定构件危险部位;然后选取轮盘 1/6 扇形区作弹塑性应力分析局部模型。榫槽应力集中区域为弹塑性区,有限元网格如图 2 中 $AB C D E$ 所示,再在局部模型边界点上施加指定位移边界条件,位移值则选取轮盘 1/4 扇形区相应点的线弹性计算结果。假设三对榫齿六个榫齿面受力相等,每对齿面沿接触面应力均匀分布。

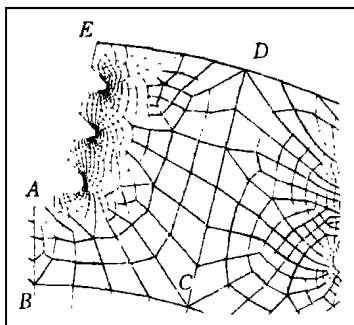


图 2 非线性区网格

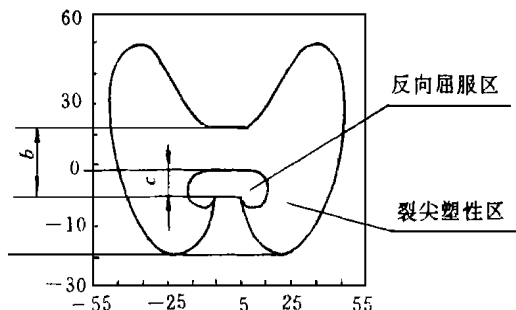


图 3 裂尖塑性区及反向屈服区尺寸形状

在 $8820 \sim 490 \text{ MPa}$ 梯形载荷波作用下计算出涡轮盘试件榫槽中的裂纹尖端塑性区大小与反向屈服区尺寸见图 3 及表 1 所示。

表 1 裂尖塑性区及反向屈服区尺寸(mm)

裂纹长度	0	0.46	0.95	1.65	2.21	2.82
裂尖塑性区 b	0.81	0.66	0.79	1.11	1.33	1.60
反向屈服区 c	0.46	0.49	0.35	0.56	0.61	0.61

计算出的起始寿命及裂纹扩展寿命在表 2(a) 中列出, 表 2(b) 为构件 3 次损伤试验数据。裂纹长 3 mm 时, 试验循环数 1320 次, 两者相对误差 52%, 裂纹长 2 mm 时, 试验循环数 880 次, 两者相对误差为 28%, 都在工程允许误差范围内。

表 2 试件榫槽处的起始寿命及裂纹扩展寿命计算值(a) 和裂纹长度随循环数增加的试验值(b)

寿 命	起始寿命	扩展寿命(循环数)					N_0	1	2	3
裂纹长度(mm)	0.46	0.95	1.65	2.21	2.28	2.28	循环次数	1350	1320	880
循环次数	396	506	562	592	634	634	裂纹长度(mm)	无	3.0	2.0

由计算结果与试验值比较, 证明了本课题所建立的损伤力学理论及计算方法的合理性, 这为损伤力学分析方法今后向工程实际应用及推广探索了道路, 提供了可能性。

5 结 论

进行了涡轮盘试件榫槽裂纹扩展规律的损伤力学方法的计算分析, 研究了各种因素对计算误差的影响, 其结果如下: 在裂纹起始寿命计算中, 改变最小单元的尺寸, 结果表明, 梯形载荷波下, 单元的最小尺寸小于反向屈服区尺寸时, 起始寿命的计算精度高; 对于复杂构件的裂纹起始寿命计算建议根据结构的几何和受载情况选用应力边界条件或位移边界条件; 进行结构的裂纹扩展计算时, 模型大小的选取建议先进行所选模型的线弹性计算, 考察边界条件对裂尖应力场的影响, 选取消除边界效应的模型进行构件的裂纹扩展计算; 对不同保载时间下全寿命的计算结果表明, 高温下考虑蠕变效应的必要性。不同载荷峰值下对裂纹扩展寿命的计算结果与试验的对比表明了, 本文所提出的裂纹萌生与裂纹扩展方向判断的准则的合理性与实用性。在现有文献中尚未见到过, 故它具有一定的创造性。

参 考 文 献

1 Duan Zouxian, Ning Youlian, He Jinrui The Behaviour of Creep- Fatigue Interaction in GH36 Superalloy. A S M E 85-IGT- 95

2 张林 高温构件疲劳断裂的损伤力学分析: [博士论文] 北京航空航天大学, 1995

3 Lemaitre J. How to Use Damage Mechanics, Null Engng Des 80, 1984

4 Chaboche J L. Continuum Damage Mechanics- a Tool to Describe Phenomena before Crack Initiation Nuch Engng Des 64 233- 247, 1982

5 Kachanov. Continuum Model of Medium With Crack. J. Eng Mech. Drv Prov. Am. Goc Civ Eng 106, 1980

6 杨慧 涡轮盘榫槽的损伤力学分析: [硕士论文] 北京航空航天大学, 1997

(责任编辑 王震华)

NONLINEAR DAMAGE ACCUMULATION MODEL FOR TURBINE DISC SLOTS

Yang Hui, Zhang Jin, Nie Jingxu, Hou Guisang

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

ABSTRACT The crack initialization life and crack propagation life of turbine disc slots at high temperature under the fatigue/creep interaction are studied according to damage mechanics. The modified Chaboche's damage model of low cycle fatigue and the improved Kachanov's damage model of the creep crack propagation have been combined to establish a nonlinear damage accumulation model. A model of crack propagation under fatigue/creep interaction has been developed, based on the above mentioned model. The good agreement between the calculated results and experimental data demonstrates that the model is quite effective. Damage FEM has been developed according to damage mechanics and FEM. The method uses finite element mesh dimension to simulate damaged crack length. The criteria for the crack initialization and the crack propagation orientation are established and testified by the calculation of the fir-tree slots of a turbine disc under the two kinds of loading conditions. The effects of mesh's minimum dimension, the stress boundary condition and the displacement boundary condition of the calculation model on the crack initial life of the structure are analyzed. It is also discussed, how the calculation model scale and the peak value of trapezoid loading spectrum affect the crack propagation life of a two-dimensional structure.

Key Words Turbines Fatigue creep Crack propagation Damage mechanics

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON TRAVELLING WAVE VIBRATION OF HIGH-SPEED ROTATING SHELL

Hong Jie, Guo Baoting, Zhu Zigen

(24th Dept Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT The experimental investigation on vibration characteristics of thin cylindrical shell with axial symmetry has been performed. The experimental modal analyses have been done under static condition and high-speed rotating condition for a given thin cylindrical shell by using shock vibration excitation method. The experimental results indicate that the vibration characteristics of the rotating thin cylindrical shell are different from those of rotating disk. For the former, due to the effect of Coriolis, there exist forward and backward travelling wave vibrations with different frequencies in view of rotating coordinate system and the frequency differences between two travelling waves are in a linear relationship with rotating speeds. The experimental results have a good agreement with the theoretical analysis, and it is very useful for the vibration design of a rotating cylindrical shell for turbine engine.

Key Words Rotation Shells Travelling waves Vibrations Modal analysis