

文章编号:1000-8055(2011)09-2039-05

考虑尺寸效应的轮盘应力疲劳 概率寿命分析方法

陆 山, 张 鸿, 唐俊星, 王春光

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 针对基于应变寿命模型的体积方法对中、长寿命轮盘及模拟件寿命预测精度不准的缺陷, 提出了考虑尺寸效应基于应力寿命模型的体积方法, 将最大应力比作为寿命可靠性计算的一个参数. 对轮盘模拟试件进行了考虑尺寸效应的疲劳寿命可靠性分析, 计算概率寿命与试验中值寿命相差 14%, 吻合良好. 而传统的应变寿命点方法中值寿命预计结果误差达 15 倍之多. 表明考虑尺寸效应的应力寿命体积方法可以用来预估中、长寿命轮盘及模拟件的概率寿命.

关 键 词: 应力寿命法; 尺寸效应; 可靠性; 体积方法; 疲劳寿命; 轮盘

中图分类号: V231.95; O346.2

文献标志码: A

Analysis method for the stress fatigue probability life of a disk considering size effect

LU Shan, ZHANG Hong, TANG Jun-xing, WANG Chun-guang

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Considering the flaw of precision in forecasting the medium-long and long life of disks and simulation specimen with volume method based on the strain life model, volume method based on the stress life model was proposed to compute the life of disks, which considered the size effect. The maximum stress and stress ratio have been taken into the life reliability computation of the disk as parameters. Then the fatigue life reliability of a disk simulation specimen was analyzed by the method given. The difference between computational median life in the method and the experimental median life is only 14%, and they fit well with each other. While the computational median life in the strain based method is only sixteenth of the experimental median life. It is shown that volume method based on the stress life model which considering the size effect can be used to estimate the probabilistic life of the medium-long and long life of disks and simulation specimen.

Key words: stress-life method; size effect; reliability; volume method; fatigue life; disk

轮盘是航空发动机关键件, 轮盘寿命可靠性要求高, 是制约整个发动机寿命的瓶颈. 目前, 轮盘寿命可靠性评定可采用两大类方法: 试验评估方法和数值模拟方法. 对造价昂贵、试验成本极高的航空发动机轮盘, 通常只能采用极小子样寿命

试验. 现有的数值模拟方法一般采用局部应力应变法, 其核心思想是: 等应力(应变), 等损伤. “点准则”疲劳可靠性分析方法是一种比较成熟的数值分析方法. 但众多试验表明: 如果构件尺寸越大, 周期重复性子区域数越多, 最大应力相同时应

收稿日期: 2010-10-18; 修订日期: 2010-12-27

作者简介: 陆山(1955—), 男, 浙江吴兴人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事航空发动机结构、强度、寿命及可靠性的方面研究.

力梯度越小,则疲劳寿命越短,疲劳寿命具有明显的尺寸效应特征. 疲劳尺寸效应很早就为疲劳试验所发现. Peterson, Neuber, Hardrath 等人在研究缺口疲劳强度极限时,发现疲劳强度系数 K_f 随缺口半径尺寸而变化^[1-3]. Siebel 考虑的是相对应力梯度,得出疲劳缺口系数与理论集中系数的比值只和材料及缺口半径有关^[4]. Buch 通过对钢材光棒的疲劳试验论证了疲劳强度极限随光棒直径增加单调下降,且随着半径的增大下降趋势有所变缓,疲劳强度极限在所研究的尺度范围内最大下降 20% 左右^[5]. Weibull 则运用串联系统可靠度理论以概率方式解释了疲劳尺寸效应^[6]. 上述文献中开创性地提出了尺寸效应的修正方法,所提出的修正公式精度较好,计算也简单,但是都偏重理论研究,工程应用比较困难. 目前国内关于考虑尺寸效应对疲劳寿命影响的研究的相关资料很少. 其中场强法^[7]涉及到了对构件危险区域体积的考虑,效果不错,但是对于体积的选取依赖于经验,且只能给出寿命中值. 西北工业大学的唐俊星提出了考虑尺寸效应的应变疲劳寿命可靠性分析方法^[8],即“等应变等体积,则等寿命”的基本准则. 文献[8]对某涡轮盘进行概率寿命分析,预测结果与试验结果吻合,但该方法对中、长寿命轮盘寿命预测结果不是十分理想^[9]. 本文提出了基于应力寿命模型的体方法,其核心思想是:等应力、等危险体积、等损伤,主要适用于中、长寿命轮盘的寿命预测.

1 考虑尺寸效应的应力疲劳寿命可靠性分析方法

幂函数模型认为峰值应力与寿命在双对数坐标系下为线性关系,即

$$\lg N = a + b \lg S_{\max} + \xi \quad (1)$$

“等应力等体积,等寿命”的“体方法”比“点准则”理论上更符合疲劳失效机理,能够反映体积越大,寿命越短的试验现象. 关键是体积不等时如何进行寿命等效换算.

文献[8]采用 Weibull 串联系统理论,以标准试棒为例,将等直棒沿轴向 n 等分,推导出每一小块体积失效概率为

$$P_f(V_i) = 1 - [1 - P_f(V_{\text{ref}})]^{V_i/V_{\text{ref}}} \quad (2)$$

其中为等直棒等分后的每一小块体积, V_{ref} 为总体积, $P_f(V_i)$ 为每一小块体积的失效概率, $P_f(V_{\text{ref}})$ 为标准试棒失效概率. 并且得出:将等直棒沿轴向非等分时该结论同样成立. 式(2)的意义

在于:给定寿命条件下,每一小块体积的失效概率可以通过与该体积应力状态相同的等直棒失效概率转换得到. 式(2)实际可构成的一个 P - V - N 曲面.

对于任何一个复杂受力体,总可以划分成许多应力不等的小子块,如果标准试棒在各种循环应力状态下其疲劳寿命失效概率是已知的,通过式(2)可求得给定寿命下的每一小子块的失效概率,再根据串联系统理论,容易求得该复杂受力体失效概率.

不过有两点需要说明:①即便是等直棒,在两端圆弧过渡处仍有少许应力集中,引起失效概率不均,文中暂且忽略这一点变化;②式(2)基于串联系统可靠性理论,隐含每一小块体积是独立的,形状是特定的(形状是原系统的沿某个几何方向比例缩放),不能任意划分,但这里将该条件放松,即认为在等直棒内考虑的体积内,只要两小块体积一样,其失效概率就一样,也即是本文提出的准则:“等应力等危险体积,则等寿命”. 在这些假设的基础上,可以考虑由于应力梯度引起的尺寸效应.

假如标准试棒的 P - S - N 曲面写成

$$P_f(V_{\text{ref}}) = H(N, S, R, V_{\text{ref}}) \quad (3)$$

对于特定标准试棒, H 函数中试样体积 V_{ref} 为常数,通过式(2)和(3)可以计算小块体积给定寿命 N_f 下的失效概率

$$P_f(V_i) = H(N, S, R, V_i) \quad (4)$$

其中 S 和 R 分别为小块体积 V_i 的最大应力和应力比,在给定的区间内可以插值得到该应力比下的 P - S - N 曲面.

对于复杂受力结构,体积 V_{sys} , 其给定寿命 N_f 下的失效概率为

$$P_f(V_{\text{sys}}) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_f(V_i)] = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - H(N, R, S, V_i)] \quad (5)$$

式中 n 表示模型分网后的有限元单元再子分形成小子块的个数, H 函数以寿命 N 、应力比 R 、最大应力 S 和体积 V_i 为自变量,计算给定寿命件 N_f , 在最大应力 S 、应力比 R 的循环作用下,小子块体积 V_i 的失效概率. 这 5 个变量张成的空间为 5 维曲面,通过该曲面可以计算任何复杂受力结构的疲劳概率寿命.

采用式(2)计算复杂结构给定寿命失效概率时,要求每个小子块近似为均匀应力场,因此对应力场不均匀程度较大的单元,需要进一步在单元内子分,进行等应力分级体积累积. 如果单元在局

部坐标系下每个方向被分 m 等分,单元将被分割成 m^3 个小子块,逐个计算这 m^3 个小子块形心处的峰值应力状态,并近似认为每个小子块的体积为整个单元体积的 $1/m^3$,将全部单元按等应力区间进行体积累加,即得到结构按应力分等级的体积分布情况.基于应力寿命模型的体方法用单元 8 个角节点应力分量在局部坐标系下插值单元内任意一点应力分量 $\sigma^{[10]}$.

考虑尺寸效应的应力疲劳寿命可靠性分析方法流程见图 1.

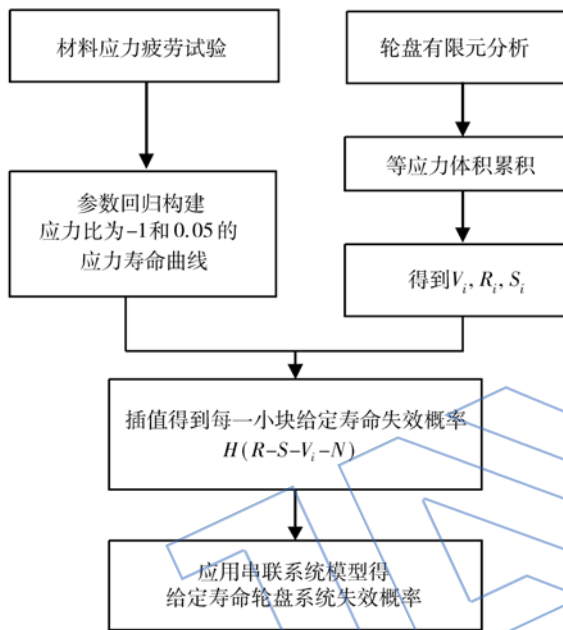


图1 考虑尺寸效应应力寿命疲劳可靠性分析方法流程

Fig. 1 Reliability analysis method for the fatigue stress-life of a disk considering the size effect

2 基于应力寿命模型体方法的轮盘模拟试件概率寿命分析

2.1 模拟试件概况

模拟试件 1/2 实体模型见图 2. 该试件材料为 FGH96, 疲劳试验谱为 $270 \sim 6090 \sim 270$ N.

2.2 FGH96 材料应力寿命曲线

根据 FGH96 材料的试验数据可以拟合得到理论应力集中系数 $K_t=1$ 应力比 $R=-1$ 和 $R=0.05$ 的材料最大应力和疲劳寿命的曲线公式分别为

$$\lg N = -13.956 \lg S_{\max} + 44.875 + \eta \quad (6)$$

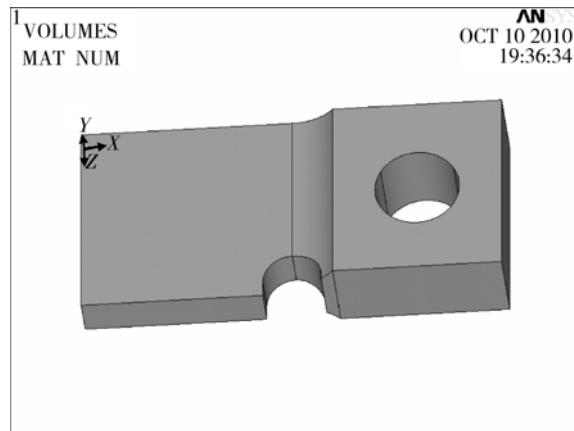


图2 模拟试件 1/2 实体模型

Fig. 2 1/2 simulate specimen modal

其中

$$\eta \sim N(0, \sigma_\eta^2), \quad \sigma_\eta = 0.19887$$

$$\lg N = -7.3524 \lg S_{\max} + 27.694 + \xi \quad (7)$$

其中

$$\xi \sim N(0, \sigma_\xi^2), \quad \sigma_\xi = 0.13551$$

通过线性插值得到应力比介于 -1 和 0.05 之间的任意应力寿命曲线.

2.3 模拟试件弹塑性有限元分析

对模拟试件进行弹塑性有限元分析,得到各节点峰值载荷第一主应力与平均应力见图 3. 从图 3 中可以看出,第一主应力越大,平均应力也越大,而且平均应力与第一主应力的线性相关性很强.在第一主应力大于 400 MPa 时,个别点随着第

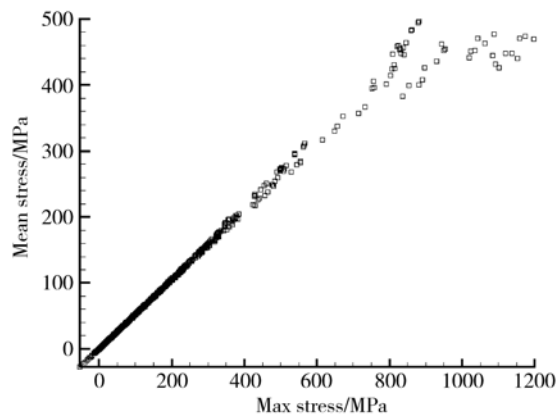


图3 各节点第一主应力与平均应力

Fig. 3 First principal stress and mean-stress of each node

一主应力增大,其平均应力增幅有所变化,产生一定的分散性,但总的趋势没有改变,这反映出模拟试件受力基本在弹性范围。

2.4 危险体积按应力水平累积

对模拟试件第一主应力分级按单元逐个进行体积累积,第一主应力按9 MPa分一级,平均应力按5 MPa分一级,累积具有相同第一主应力及平均应力水平的小子块体积,体积累加完成后得到结构关于第一主应力及平均应力的体积分布。再将具有相同应力水平的体积累积(忽略平均应力差别),得到模拟试件体积随应力水平的分布情况见图4(按2倍体积计算)。由图4可以看出,模拟试件绝大部分体积应力处于500 MPa以下。由于应力水平低,对模拟试件给定寿命,这部分体积经数值模拟是安全的,本文选择应力大于500 MPa的体积作为模拟试件危险体积,危险体积分布随最大应力增大总体上呈递减规律。

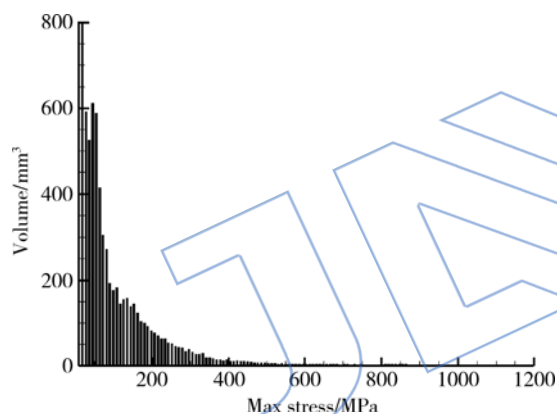


图4 模拟试件体积随应力水平分布情况

Fig. 4 Distribution of simulate specimen volume with stress

与基于应变寿命的体方法中危险体积累积不同的是:基于应力寿命的体方法中需将应力比作为另一寿命可靠性计算参数,在对危险体积进行应力水平累积的同时,也计算出各个小子块形心处的应力比,见图5。

2.5 模拟试件体方法的寿命可靠性分析

图6给出了以体积为 37 mm^3 的标准试棒作为参考体积所计算的模拟试件疲劳寿命概率曲线。参考体积的获取方法:以标准等直棒($\Phi=5.5\text{ mm}$,等直段长 16 mm)相同应力水平下中值寿命的等效体积。将本文采用基于应力寿命模型体方法的概率寿命计算结果与应变点方法结果和应

变寿命体方法的计算结果进行比较见表1。

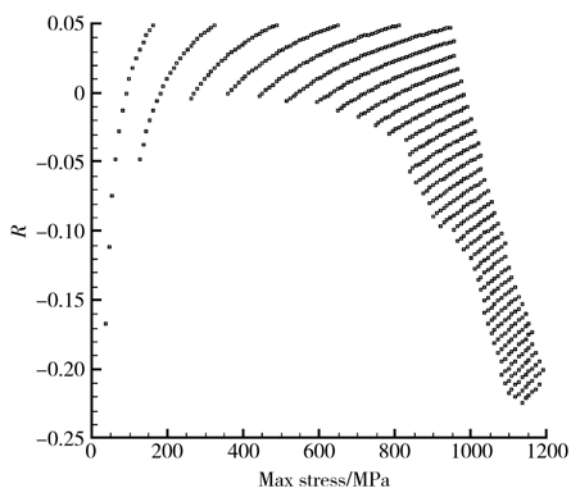


图5 模拟试件小子块应力比

Fig. 5 Simulate specimen stress ratio of kids block

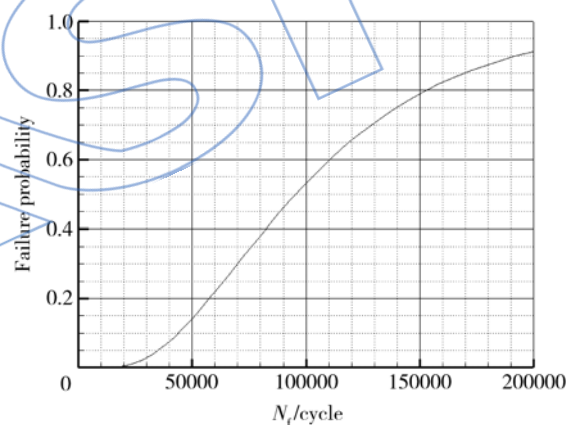


图6 模拟试件疲劳寿命概率曲线

Fig. 6 Fatigue life probability curve of simulate specimen

由表1中的数据可以看出:体方法计算的中位寿命偏大,点方法计算结果偏小,符合一般规律;基于应变寿命模型体方法的计算结果大得离谱,再次体现了基于应变寿命模型体方法对中、长寿命轮盘及其模拟件寿命预测不准的缺陷;与试验结果相比,基于应力寿命模型的体方法计算结果仅为试验结果的1.14倍,应变点方法计算结果是试验结果的0.0612倍,相比之下,采用基于应力寿命体方法对中、长寿命轮盘及其模拟件进行概率寿命预测,结果更合理。

表 1 模拟试件概率寿命计算结果
Table 1 Probability life result of the simulate specimen

计算方法	$N_{0.13}$ /cycle	N_{50} /cycle	$N_{99.87}$ /cycle	$N_{50}/N_{99.87}$
应变寿命点方法	28 115	5 107	976	5.233
应变寿命体方法		$>10^7$	251 149	
应力寿命体方法	431 096	95 480	16 139	5.916
试验结果	83 482(四件均值)			

3 结 论

1) 考虑了应力梯度引起的尺寸效应,提出了基于应力寿命模型的体方法,并建立了数学模型、解题步骤以及基于 VC 语言平台的应力寿命分析体方法软件系统。

2) 采用基于应力寿命模型的体方法对 FGH96 轮盘模拟试件进行概率寿命分析,计算结果与实验结果吻合,表明基于应力寿命模型的体方法可以用于中、长寿命轮盘的寿命估计。

3) 弥补了基于应变寿命模型的体方法对中、长寿命轮盘模拟件寿命预测不适用的缺陷,拓展了体方法的使用范围,以供工程中轮盘及其模拟件寿命评估时应用。

参考文献:

[1] Peterson R E. Stress concentration factors[M]. New York: John Wiley & Sons,1974.

[2] Neuber H. Theory of notch stresses[M]. Virginia: USAEC Office of Technical Information,1961.

[3] Kuhn P,Hardran H F. An engineering method for estimating notch-size effect in fatigue tests of steel[R]. Report NACA TN 2805,1952.

[4] Siebel E,Stieler M. Significance of dissimilar stress distri-

butions for cyclic loading[J]. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure,1955,97(5):121-131.

[5] Buch A. Evaluation of size effect in fatigue tests on un-notched specimens and components[J]. Archiv Furdas Eishuttenwesen,1972,43(4):885-900.

[6] Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability[J]. Journal of Applied Mechanics,1951,18(2):293-297.

[7] 李玉春,姚卫星,温卫东. 应力场强法在多轴疲劳寿命估算中的应用[J]. 机械强度,2002,24(2):258-261.
LI Yuchun,YAO Weixing,WEN Weidong. Applications of stress field in multi axial fatigue life estimate[J]. Journal of Mechanical Strength,2002,24(2):258-261. (in Chinese)

[8] 唐俊星. 含夹杂粉末盘概率寿命三维仿真方法与应用[D]. 西安:西北工业大学,2008.
TANG Junxing. 3D simulation method of probabilistic life of powder metallurgy disk containing inclusions and application[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University,2008. (in Chinese)

[9] 高德平. 机械工程中的有限元法[M]. 西安:西北工业大学出版社,1993.

[10] 杨剑秋. 轮盘应力寿命可靠性分析方法研究及应用[D]. 西安:西北工业大学,2006.
YANG Jianqiu. Application and research on the method for stress based life and its reliability analyses of disc[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University,2006. (in Chinese)