

文章编号:1000-8055(2013)06-1236-07

考虑应力梯度的轮盘疲劳寿命预测

石 亮, 魏大盛, 王延荣

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 考虑应力梯度和尺寸效应对寿命的影响, 通过引入应力梯度影响因子, 将缺口试件与光滑试件的疲劳寿命相关联, 建立了基于 Walker 平均应力修正的缺口试件寿命预测模型, 进而结合三维弹性有限元分析对发动机涡轮盘进行了寿命预测。结果表明: 所发展的寿命模型能较好地反映影响疲劳寿命的多种因素, 尤其是应力集中对试件疲劳寿命的影响。综合考虑平均应力、应力梯度和尺寸效应的轮盘寿命预测结果更接近试验值, 对 GH901 标准试件和轮盘的疲劳寿命预测结果都在 2 倍分散带以内。

关 键 词: 疲劳寿命; 缺口疲劳; 应力梯度; 尺寸效应; 轮盘

中图分类号: V231.9

文献标志码: A

Fatigue life prediction of turbine disk based on stress gradient

SHI Liang, WEI Da-sheng, WANG Yan-rong

(School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The effects of stress gradient and dimensional size on fatigue life were investigated. The relationship between the notched specimen and the smooth specimen was correlated by introducing the stress gradient effect factor, and a new model of predicting notched specimen based on the Walker modification for the mean stress effect was established. Three-dimensional elastic finite element (FE) analysis of a turbine disk was carried out to obtain the fatigue parameters for predicting its life. The result shows that this model can well reflect several effects on fatigue life, especially the effect of stress concentration on the fatigue life of specimen. If the mean stress, stress gradient and size effect are considered comprehensively, the prediction result of the disk is closer to the experiment result. This model gives a prediction falling within a scatter of two for both GH901 standard specimen and the disk.

Key words: fatigue life; notch fatigue; stress gradient; size effect; disk

涡轮盘是航空发动机的关键结构件之一, 低循环疲劳破坏是其主要失效形式。轮盘失效对发动机的影响通常是灾难性的^[1]。因此, 涡轮盘低循环疲劳寿命预测方法研究对工程设计具有重要意义。

轮盘上的应力集中部位在轮盘寿命计算时需

要重点考核。目前, 针对轮盘的寿命预测普遍采用的是名义应力法和局部应力应变法^[2]。名义应力法需要确定局部应力集中系数, 而对实际构件的应力集中系数通常较难确定。另外, 利用材料已有的应力疲劳寿命($S-N$)曲线外插得到实际构件的寿命

收稿日期: 2012-06-27

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130617.0940.201306.1236_003.html

基金项目: 国家自然科学基金(51105023)

作者简介: 石亮(1986—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士生, 主要从事航空发动机结构强度振动与疲劳可靠性研究。

曲线也会带来很大的误差.局部应力应变法同样难以准确获得缺口疲劳系数 K_f ,且局部应力应变法需要结合 Manson-Coffin 公式进行平均应力修正,采用不同的修正方式导致预测结果相差较大.

缺口试件由于应力集中引起较大的局部应力梯度,在同样的加载条件下缺口试件由于局部的应力集中,寿命要低于光滑试件,应力集中及其梯度将对寿命产生影响.针对缺口试件的疲劳寿命预测方法研究人员提出了多种模型,早期分别由 Neuber^[3]和 Peterson^[4]提出了考虑缺口根部应力分布对疲劳寿命影响的预测思想,Neuber 提出将距缺口根部一定距离内的应力平均值作为寿命预测的参数,而 Peterson 提出将距缺口根部一定距离处一点的应力值作为寿命预测的参数.近年来,基于上述思想 Taylor^[5]和 Tanaka^[6]分别独立提出了临界距离理论(theory of critical distance, TCD),根据不同的应力平均思想可以分为点法、线法和面法.国内外学者对临界距离法进行了大量的应用研究,并取得了一些成果^[7-8],但临界距离理论在中低周疲劳缺乏较为明确的理论基础且要准确确定出临界距离仍有一定困难,因此其实际应用仍有待于研究.此外,基于考虑构件危险点附近应力梯度和危险体积的影响,姚卫星^[2]提出了应力场强法,该方法提出了一个描述损伤区域内的控制参数——应力场强,当应力场强值达到临界值即发生疲劳破坏.应力场强法能够较好地解释一些影响疲劳机理的因素,具有一定的工程应用前景.影响疲劳寿命的另一个重要因素是尺寸效应的影响,对于大尺寸构件,由于材料的不均匀性和内部缺陷等,其疲劳破坏也更容易发生^[9].因此,在使用标准材料试件的试验数据预测涡轮盘等结构件时考虑尺寸效应的影响是必要的,目前关于尺寸效应的研究还不多^[10-11].

在考虑缺口区域应力分布特点的前提下,引入应力梯度影响因子将缺口试件与光滑试件的疲劳寿命相关联,针对存在应力梯度的构件建立了寿命预测模型,并进一步考虑尺寸效应的影响,在已建立的缺口试件寿命预测模型的基础上引入尺寸效应影响因子,得到考虑尺寸影响的寿命模型.为验证所提出的模型的合理性,本文分别对标准材料试件和发动机涡轮盘进行了寿命预测,与试验结果对比表明考虑尺寸效应的寿命模型更接近实际情况,其预测分散带也更小.所发展的模型只需要进行弹性有限元分析,其在工程设计中具有实用性.

1 基于应力梯度效应的寿命预测模型

利用已有的材料数据对实际构件进行寿命预测通常要考虑两个关键因素:一是应力比,材料试验数据通常是在几个给定的应力比下进行的,而实际构件的载荷条件通常要比材料试验的复杂得多.常用的解决办法是对寿命方程进行平均应力修正,针对不同的材料,很多研究者提出了不同的修正模型^[12-14];二是应力集中的影响,材料试验数据通常只进行给定应力集中系数的缺口试件的疲劳试验,而实际构件因几何形状复杂,往往难以确定理论应力集中系数或者所确定的理论应力集中系数与材料试验数据不同.本文将重点针对上述问题进行研究.首先利用已有的材料试验数据将光滑试件疲劳试验数据结合 Walker 修正,得到一个含有应力比的统一形式的寿命方程;其次引入应力梯度影响因子和梯度影响指数,将含有应力集中的试件与光滑试件的疲劳性能相关联,实现针对含有应力集中构件的寿命预测,在此基础上,引入尺寸效应的影响,实现对寿命模型的修正,发展完善了含尺寸效应影响的寿命模型.

1.1 平均应力修正的寿命模型

常用于低循环疲劳寿命预测的模型为

$$\epsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (1)$$

由于该模型通常是在应力比 $R = -1$ 的试验条件下得到的,因此预测其他应力比条件下的寿命需要进行平均应力修正.利用 Walker 平均应力修正模型^[15],使用其他应力比(如 $R = 0.1$ 等)条件下的试验数据可以得到一个包含应力比修正的应变寿命方程

$$\epsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} \left[2N_f \left(\frac{1-R}{2} \right)^{\frac{1-\gamma}{b}} \right]^b + \epsilon'_f \left[2N_f \left(\frac{1-R}{2} \right)^{\frac{1-\gamma}{b}} \right]^c \quad (2)$$

1.2 计入应力梯度效应的寿命模型

研究表明,局部应力梯度对寿命有较大的影响.为考查应力梯度对寿命的影响,分别对不同应力集中系数的标准含 V 型圆缺口的圆棒试件进行了弹性有限元分析.本文定义

$$\sigma' = \frac{\sigma}{\sigma_{\max}}, \quad x' = \frac{x}{r} \quad (3)$$

其中 $\sigma, \sigma_{\max}$ 分别为缺口处的应力与最大应力; x 为缺口根部圆弧线中点沿圆棒表面法向指向圆棒内部的距离, r 为缺口根部圆角半径。

对于含 V 型圆缺口的圆棒试件, 其局部归一化应力分布如图 1 所示。

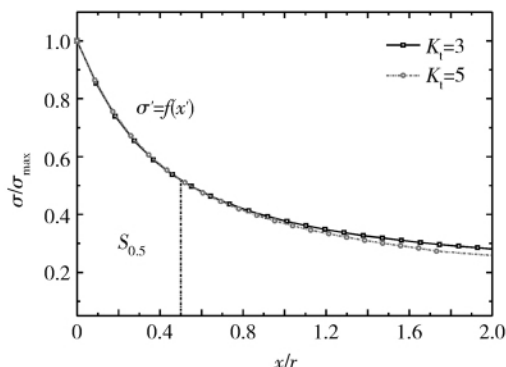


图 1 缺口圆棒试件局部归一化应力分布

Fig. 1 Non-dimensional local stress distribution of notched pole specimen

由图 1 中可知, 对不同的理论应力集中系数, 在 $0 < \frac{x}{r} \leq 0.5$ 范围内, 归一化的缺口局部应力分布几乎相同. 因而引入应力梯度影响因子, 并定义如下:

$$Y = \frac{1}{2S_{0.5}} \quad (4)$$

其中 $S_{0.5}$ 为曲线 $\sigma' = f(x')$ 与 x/r 轴在 $0 \sim 0.5$ 区间上所围成的面积。

针对缺口试件, 通过修正寿命方程将存在应力集中的试件与光滑试件的疲劳寿命相关联, 基于这种思想在所提出的应力梯度影响因子的基础上引入应力梯度影响指数, 得到修正的寿命方程

$$\epsilon_a = Y^m \left\{ \frac{\sigma'_t}{E} \left[2N_f \left(\frac{1-R}{2} \right)^{\frac{1-\gamma}{b}} \right]^b + \epsilon'_f \left[2N_f \left(\frac{1-R}{2} \right)^{\frac{1-\gamma}{b}} \right]^c \right\} \quad (5)$$

其中 m 为应力梯度影响指数. 针对不同材料的缺口试件的研究表明, m 与试验寿命 N_f 存在如下关系:

$$m = A(2N_f)^B \quad (6)$$

其中 A, B 为常数, 可通过试验数据获得。

1.3 计入尺寸效应的寿命模型修正

对于存在应力集中的构件, 其应力集中区域

内的应力分布将对寿命产生影响, 这种影响一般大尺寸构件比小尺寸构件更为明显. 本文用平均应力梯度来刻画尺寸效应的影响. 对两种不同理论应力集中系数的标准试件进行弹性应力分析, 并对应力做归一化处理, 其缺口区域的应力分布如图 2 所示, 定义平均应力梯度如下:

$$g_c = \frac{\sigma'_t|_{x=r/2} - \sigma'_t|_{x=0}}{\frac{r}{2}} \quad (7)$$

由于材料手册中通常给出了 $K_t=3$ 的试验数据, 这里基于 $K_t=3$ 试件缺口处的平均应力梯度, 定义尺寸因子为

$$C = \frac{g_c}{g_3} \quad (8)$$

将尺寸效应的影响引入到寿命方程中, 得到修正的寿命方程

$$\epsilon_a = Y^m C^\alpha \left\{ \frac{\sigma'_t}{E} \left[2N_f \left(\frac{1-R}{2} \right)^{\frac{1-\gamma}{b}} \right]^b + \epsilon'_f \left[2N_f \left(\frac{1-R}{2} \right)^{\frac{1-\gamma}{b}} \right]^c \right\} \quad (9)$$

式中 α 为尺寸效应影响指数, 可通过试验数据拟合获得。

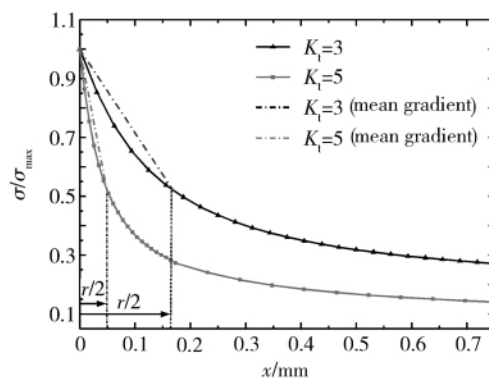


图 2 缺口圆棒试件局部应力分布

Fig. 2 Local stress distribution of notched pole specimen

2 高温合金 GH901 标准试件疲劳寿命分析

为了验证寿命预测方程的有效性和确定应力梯度的影响, 首先对高温合金 GH901 的疲劳数据进行了分析. GH901 在 500°C 下的疲劳试验数据见表 1^[16].

表 1 GH901 合金试件在 500℃ 下的疲劳性能(单位:cycle)
Table 1 Fatigue properties of GH901 at 500℃ (unit:cycle)

		$N_f=5\times 10^3$		$N_f=10^4$		$N_f=5\times 10^4$		$N_f=10^5$	
		$K_t=1$	$K_t=3$	$K_t=1$	$K_t=3$	$K_t=1$	$K_t=3$	$K_t=1$	$K_t=3$
$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	$R_{0.1}$		725	875	625	665	405	581	330
	$R_{-1.0}$	620	470	540	390	390	245	350	200

2.1 应力比的影响

利用光滑试件($K_t=1$)在不同应力比条件下拟合得到 Walker 平均应力修正参数见表 2.

表 2 Walker 寿命方程中的参数
Table 2 Parameters in Walker life equation

E/GPa	σ'_f/MPa	ϵ'_f	b	c	γ
170	3 508	18.65	-0.189	-1.25	0.63

由平均应力修正的 Walker 寿命方程得到等效寿命 N_w 与实际寿命 N_f 的关系式

$$N_w = N_f \left(\frac{1-R}{2} \right)^{\frac{1-\gamma}{b}} \tag{10}$$

图 3 给出了 GH901 平均应力修正的结果,可以看出 Walker 平均应力修正方程将不同的应力比条件下的寿命结果拟合为一条曲线,从而实现了不同应力比下光滑试件的寿命预测.

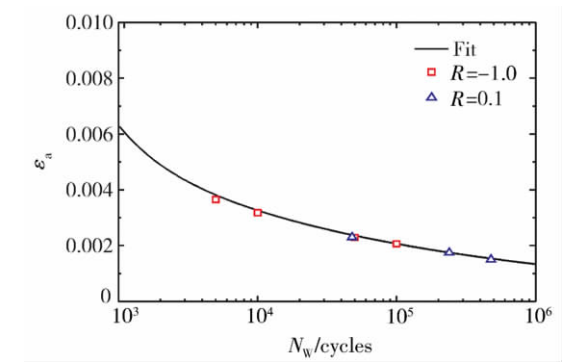


图 3 Walker 平均应力修正的寿命曲线
Fig. 3 Life curve modified by Walker's mean stress

2.2 应力梯度的影响

为了利用式(5)计算缺口圆棒试件的疲劳寿命,需要确定应力梯度影响因子和应力梯度影响指数,其计算过程如下:

首先对缺口圆棒试件进行轴对称线弹性有限元分析,缺口局部的应力分布如图 4 所示.

根据材料缺口圆棒试件的局部应力分布,求得应力梯度影响因子 $Y=1.4214$.

然后利用 Neuber 法计算得到缺口圆棒试件($K_t=3$)局部应变幅,使用完全对称加载条件($R=-1.0$)下的试验数据对参数 A, B 进行拟合,拟合结果如图 5 所示.

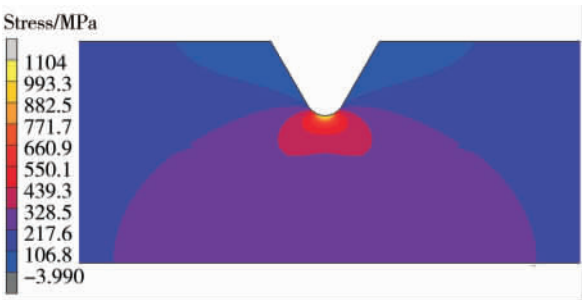


图 4 缺口圆棒试件局部应力分布
Fig. 4 Local stress distribution of notched pole specimen

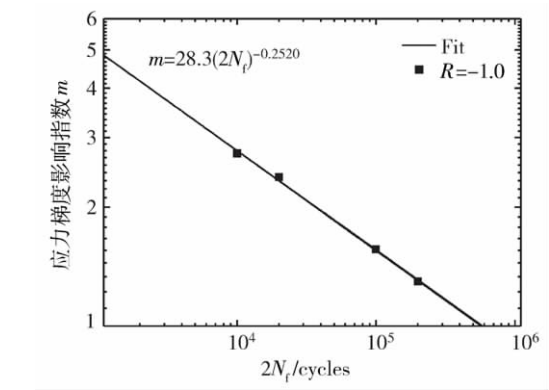


图 5 应力梯度影响指数 m 与寿命 $2N_f$ 的关系
Fig. 5 Stress gradient effect exponent m versus life $2N_f$

2.3 标准试件疲劳寿命预测

利用 Neuber 法计算得到缺口圆棒试件在不同应力比条件下的局部应力应变幅值,使用修正的寿命方程对不同应力比条件下缺口试件进行寿命预测,结果见表 3 和图 6.

表 3 缺口圆棒试件寿命预测结果

Table 3 Life prediction of notched pole specimen

	$\sigma_{\max}/$ MPa	$\sigma_a/$ MPa	$N_f/$ cycle ^[17]	ϵ_a	$N_f/$ cycles
$R_{-1.0}$	470	978	5 000	0.009 98	5 150
	390	892	10 000	0.007 54	9 590
	245	649	50 000	0.004 09	49 600
	200	541	100 000	0.003 26	101 250
$R_{0.1}$	625	780	10 000	0.005 51	14 965
	405	547	50 000	0.003 30	53 200
	330	450	100 000	0.002 73	91 490

由图 6 可知,将应力梯度效应引入到寿命方程中,实现了对缺口圆棒试件的寿命预测,并且预测结果分散带在 2 倍以内。其中 $R=-1.0$ 的数据用于回归有关系数,表明所提出的修正模型具有广泛的适用性。

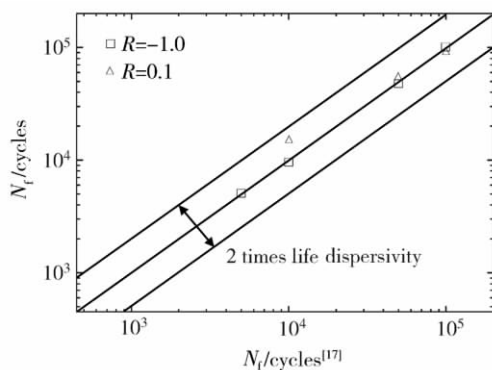


图 6 缺口圆棒试件寿命预测结果

Fig. 6 Predicted life of notched pole specimen

3 涡轮盘销钉孔边的疲劳寿命预测

涡轮盘材料为 GH901^[17], 试验条件在均温 (525℃) 下进行, 转速范围为: 650~12 640 r/min. 轮盘销钉孔边为寿命危险区域。建立扇区 (1/16 圆周) 有限元模型, 孔边局部网格进行了加密, 如图 7 所示。

轮缘施加外载荷 131.74 MPa 以模拟叶片离心力, 转速为 12 640 r/min, 扇区两侧面施加循环对称约束, 盘与轴连接处约束轴向和周向位移, 整个模型均温为 525℃。选用 MSC. MARC 有限元分析软件, 采用八节点六面体实体单元计算, 共有

21868 个单元, 27 541 节点, 计算得到轮盘周向应力应变分布如图 8 和图 9 所示。

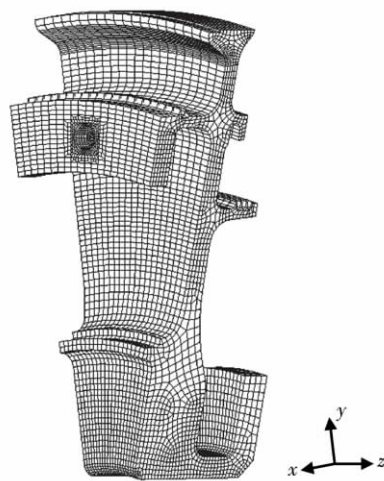


图 7 轮盘扇区 (1/16 圆周) 有限元模型

Fig. 7 FE model of turbine disk sector (1/6 sector)

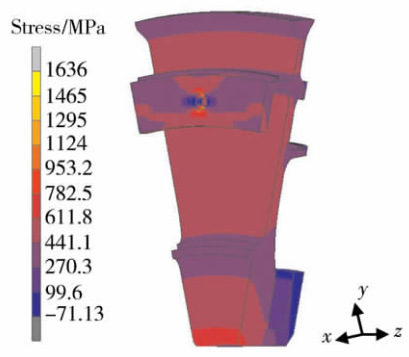


图 8 轮盘周向应力分布

Fig. 8 Hoop stress distribution of turbine disk

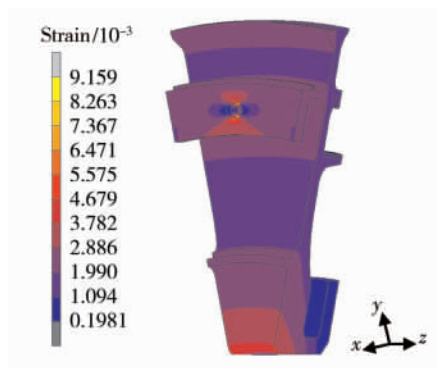


图 9 轮盘周向应变分布

Fig. 9 Hoop strain distribution of turbine disk

由三维有限元计算得到销钉孔边周向应力归一化后的分布曲线如图 10 所示. 通过多项式拟合得到孔边应力分布的曲线, 计算得到轮盘销钉孔边应力梯度影响因子为 $Y_{\text{disk}} = 1.3565$.

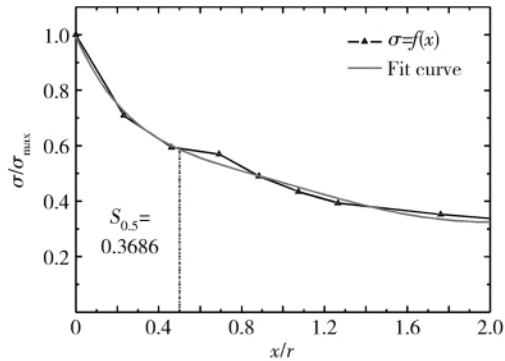


图 10 轮盘销钉孔边周向应力分布

Fig. 10 Hoop stress distribution of turbine disk pin-hole

利用弹性有限元分析得到销钉孔边局部应力最大点, 使用 Neuber 公式计算得到局部弹塑性最大应力和局部应变幅值. 应力梯度影响指数与寿命的关系式采用由材料数据拟合得到的数值.

为了验证本文提出的寿命模型的合理性, 分别采用考虑尺寸效应的模型和不考虑尺寸效应的模型对轮盘进行寿命预测, 由于 GH901 材料仅有 $K_t = 3$ 的试验数据, 模型中的 α 参考其他材料数据给定. 涡轮盘及材料标准缺口试件的局部应力分布如图 11 所示.

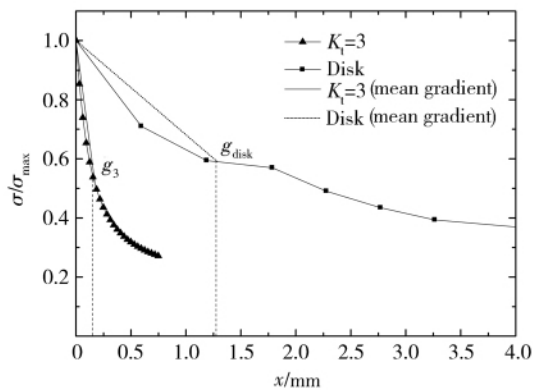


图 11 轮盘销钉孔边周向应力分布

Fig. 11 Hoop stress distribution of turbine disk pin-hole

由计算得到的轮盘局部应变幅值, 对涡轮盘进行寿命预测, 结果见表 4. 轮盘试验件裂纹萌生

寿命为 3435 次循环^[17]. 可以看出, 未考虑尺寸效应的轮盘寿命预测值 N_f 偏高超出 2 倍分散带, 而考虑尺寸效应的轮盘寿命预测值 N_f^c 更接近轮盘的试验寿命值在 2 倍分散带以内.

表 4 轮盘寿命预测结果

Table 4 Life prediction of turbine disk

$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	ϵ_a	g_{disk}/g_3	α	N_f/cycles	N_f^c/cycles
1070	0.00504	0.1138	0.3	10070	3326

4 结 论

通过对高温合金 GH901 标准试件和涡轮盘销钉孔边疲劳寿命的预测分析可以得到如下结论:

1) 利用 Walker 平均应力修正模型, 将不同应力比试验条件下的光滑试件数据拟合得到包含应力比影响的统一寿命方程, 结果表明具有很好的一致性.

2) 通过引入应力梯度影响因子和影响指数, 将存在应力集中的试件与光滑试件相关联, 得到有应力集中构件修正的寿命预测模型, 该模型对材料标准试件的预测结果在 2 倍分散带以内.

3) 采用考虑尺寸效应的寿命预测模型对涡轮盘进行了低循环疲劳寿命预测, 结果表明本文寿命模型的预测结果与试验的偏差较小在 2 倍分散带以内, 且只需要进行弹性应力分析确定局部的应力分布, 在工程上, 尤其便于方案设计阶段应用.

参考文献:

- [1] 宋兆泓. 航空燃气涡轮发动机强度设计[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1988.
- [2] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [3] Neuber H. Theory of notch stresses; principles for exact calculation of strength with reference to structural form and material[M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1958.
- [4] Peterson R E. Metal fatigue; notch-sensitivity[M]// New York: McGraw-Hill, 1959.
- [5] Taylor D. Geometrical effects in fatigue; a unifying theoretical model[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(5): 413-420.
- [6] Tanaka K. Engineering formulae for fatigue strength reduction due to crack-like notches[J]. International Journal of Fatigue, 1983, 22(5): 39-46.
- [7] Chiandussi G, Rossetto M. Evaluation of the fatigue strength of notched specimens by the point and line methods with high stress ratios[J]. International Journal of Fa-

- tigue, 2005, 27(6): 639-650.
- [8] Yamashita Y, Ueda Y, Kuroki H, et al. Fatigue life prediction of small notched Ti-6Al-4V specimens using critical distance[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77(9): 1439-1453.
- [9] 曾攀, 俞新陆, 颜永年, 等. 疲劳绝对尺寸效应[J]. 航空学报, 1988, 9(2): 144-147.
ZENG Pan, YU Xinglu, YAN Yongnian, et al. Absolute size effect on fatigue[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1988, 9(2): 144-147. (in Chinese)
- [10] 陈勃, 刘建中, 吴学仁, 等. 初始缺陷尺寸分布的尺寸效应研究[J]. 航空学报, 2006, 27(1): 44-49.
CHEN Bo, LIU Jianzhong, WU Xueren, et al. Study of size effect on initial flaw size distribution[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(1): 44-49. (in Chinese)
- [11] 陆山, 张鸿, 唐俊星, 等. 考虑尺寸效应的轮盘应力疲劳概率寿命分析方法[J]. 航空动力学报, 2011, 26(9): 2039-2043.
LU Shan, ZHANG Hong, TANG Junxing, et al. Analysis method for the stress fatigue probability life of a disk considering size effect[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9): 2039-2043. (in Chinese)
- [12] Soderberg C R, Sweden V. Factor of safety and working stress[J]. ASME Trans, AER-IS, 1930, 52(2): 13-28.
- [13] Goodman J. Mechanics applied to engineering[M]. London: Longmans, Green and Company, 1989.
- [14] Smith K N, Watson P, Topper T H. Stress-strain function for the fatigue of metals[J]. Journal of Materials, 1970, 5(4): 767-778.
- [15] Dowling N E. Mean stress effect in stress-life and strain-life fatigue[R]. Sao Paulo, Brazil: The 2nd SAE Brasil International Conference on Fatigue, 2004.
- [16] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册: 第2卷[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [17] 杨俊, 张贵斌, 祁圣英, 等. 涡轮盘传动臂销钉孔低循环疲劳寿命分析[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(9): 1490-1494.
YANG Jun, ZHANG Guibin, QI Shengyin, et al. Low cycle fatigue life analysis for the transmission pin-hole of a turbine disk[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(9): 1490-1494. (in Chinese)