

# 基于 Walker 等效应变的涡轮盘低周疲劳寿命预测

张国乾, 赵明, 章胜, 商体松

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

**摘要:** 基于 Walker 应变寿命预测模型在  $10^3 \sim 10^5$  范围变化趋势的基础上, 提出了一种简化的 Walker 应变寿命预测模型, 应用简化模型对发动机涡轮盘的低循环疲劳寿命进行了预测。采用 GH4133 合金的试验数据对简化模型进行验证; 采用不同方法对涡轮盘的寿命进行预测, 并与涡轮盘的试验值进行比较。结果表明: 本工作简化模型预测精度较高, 涡轮盘的寿命预测值与试验结果吻合较好, 并且简化模型简单明了。

**关键词:** 低循环疲劳; Walker 等效应变; 寿命预测; 涡轮盘

**doi:** 10.3969/j.issn.1005-5053.2013.6.014

**中图分类号:** V232.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-5053(2013)06-0081-05

航空发动机是飞行器的动力, 被称为飞机的“心脏”。发动机涡轮盘等零部件通常在高温高载的情况下服役, 会发生疲劳破坏<sup>[1]</sup>。据统计, 涡轮盘疲劳失效主要在  $10^3 \sim 10^5$  范围之内<sup>[2]</sup>, 大多数研究者把循环数在  $10^4$  或  $10^5$  以下的疲劳失效定义为低循环疲劳失效。目前, 国内外普遍采用基于 Manson-Coffin 公式的局部应变-寿命法估算发动机涡轮盘的低周疲劳 (LCF) 寿命<sup>[3-6]</sup>。由于发动机工作时涡轮盘承受的热应力和离心应力等疲劳载荷几乎都是非对称的, 而材料的低周疲劳性能数据大都是在对称循环载荷下得到的, 因此, 涡轮盘寿命预测时必须对材料的疲劳性能数据或曲线进行修正; 由于选用的平均应力修正方法不同, 预测结果往往有很大差别。

Walker 应变寿命模型不需要作平均应力修正, 适用于比较宽广的寿命预测。本工作根据涡轮盘低循环疲劳寿命主要分布在  $10^3 \sim 10^5$  这一特点对 Walker 应变模型进行了简化, 将简化的 Walker 应变寿命预测模型应用于 GH4133 合金的低循环疲劳寿命预测。通过采用不同方法对 GH4133 合金的寿命预测以及与涡轮盘的试验寿命相比较后, 验证了文中提出的简化寿命预测模型具有较高的精度。

## 1 Walker 应变寿命预测模型

Walker 应变寿命预测模型定义了一个包含平

均应力的等效应变参量——Walker 应变参数  $\varepsilon_w$ <sup>[7]</sup>:

$$\varepsilon_w = \left( \frac{\sigma_{\max}}{E} \right) \left( \frac{\Delta \varepsilon \cdot E}{\sigma_{\max}} \right)^m \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_w$  为 Walker 应变参数;  $\sigma_{\max}$  为最大应力, MPa;  $E$  为弹性模量, MPa;  $\Delta \varepsilon$  为应变范围;  $m$  为材料常数。

在 Walker 应变定义的基础上, Jaske 等对疲劳试验数据采用如下形式的反双曲正切函数进行拟合<sup>[8]</sup>:

$$\lg N_f = A_0 + A_1 \operatorname{arctanh} \left\{ \frac{\lg \left( \frac{\varepsilon_e \varepsilon_u}{\varepsilon_w^2} \right)}{\lg \left( \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_e} \right)} \right\} \quad (2)$$

式中:  $A_0, A_1$  为回归常数;  $\varepsilon_u$  为对应于  $1/4$  循环时的应变, 由  $\varepsilon_u = \varepsilon_w |_{N=10} + 0.0025$  确定;  $\varepsilon_e$  为对应于疲劳极限时的应变, 由  $\varepsilon_e = \varepsilon_w |_{N=10^8} - 0.0005$  确定。

图 1 给出了用反双曲正切函数描述 Walker 应变寿命  $\varepsilon_w-N$  曲线的示意图, 从中可以看到  $\varepsilon_w-N$  曲线适用于各个寿命区, 且不需要作平均应力的修正。但相对 Manson-Coffin 公式<sup>[3-5]</sup>, Walker 工作量较大, 模型中有 4 个材料常数, 拟合比较复杂, 因此限制了其在工程实际中的应用。但 Walker 应变寿命预测模型不需要进行平均应力修正, 得到了研究者广泛的关注<sup>[9-12]</sup>。

目前, 国内已完成了 5 种常用航空材料 Walker 应变寿命曲线的试验测定工作<sup>[3]</sup>。杨庆雄<sup>[3]</sup>用 Walker 应变寿命曲线拟合了 LY12-CZ 板材和 LC9-CS 板材等飞机材料的低周疲劳寿命数据。王卫国<sup>[9]</sup>对 Walker 应变寿命预测模型进行了改进, 给出

收稿日期: 2013-04-25; 修订日期: 2013-07-01

基金项目: 中科院上海高等研究所资助项目 (NBEK-0001)

作者简介: 张国乾 (1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事航空发动机强度与寿命研究, (E-mail) zhangqk168@126.com。

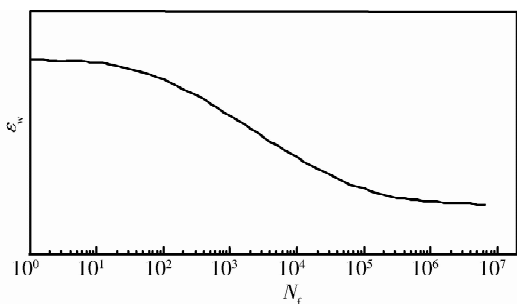
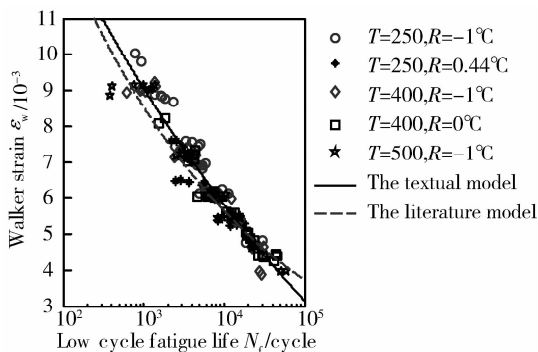
图1 反双曲正切函数描述  $\varepsilon_w$ - $N$  曲线Fig. 1 Inverse hyperbolic tangent function description  $\varepsilon_w$ - $N$  curve

图2 GH4133 合金拟合曲线

Fig. 2 The fitting curve of GH4133 material

了GH4133合金的Walker应变寿命曲线拟合公式。国外,如R. R公司把Walker应变寿命模型列入涡轮盘寿命预测新方法进行专题研究<sup>[10]</sup>。

对图1研究后发现对数坐标下Walker应变寿命预测模型 $\varepsilon_w$ - $N$ 曲线在 $10^3 \sim 10^5$ 范围内可用基本函数来进行描述。因此,本工作采用如下的指数形式对Walker应变寿命预测模型进行简化:

$$\varepsilon_w = a \cdot b^{\lg N_f} + c \quad (3)$$

式中 $a, b$ 和 $c$ 为拟合系数。

## 2 GH4133 合金简化的寿命预测模型

为了验证本工作提出的简化Walker应变寿命预测模型的有效性,对GH4133合金的疲劳寿命进行预测分析,并将理论预测值同试验结果进行比较。

首先,根据文献<sup>[9]</sup>提供的GH4133合金在5种不同工况下的中值疲劳试验数据,基于Matlab软件<sup>[13]</sup>建立的GH4133合金简化Walker应变寿命预测模型的表达式为:

$$\varepsilon_w = 0.03251 \times 0.8166^{\lg N_f} - 0.008639 \quad (4)$$

计算 $\varepsilon_w$ 时,材料常数 $m = 0.55$ <sup>[14]</sup>。

本工作与文献<sup>[9]</sup>两种模型拟合的曲线如图2所示。从图2中可以看出,本工作拟合的Walker应变寿命预测模型可以较好地描述Walker应变和疲劳寿命的关系。图3和图4分别给出了两种方法在不同温度、不同应力比下的寿命分散带。从中可以看出本工作简化模型预测精度较好,简化后的寿命模型更易于工程化应用。

## 3 模型的试验验证

为验证GH4133合金简化Walker应变寿命预测模型的正确性和合理性,对几种涡轮盘常用寿命

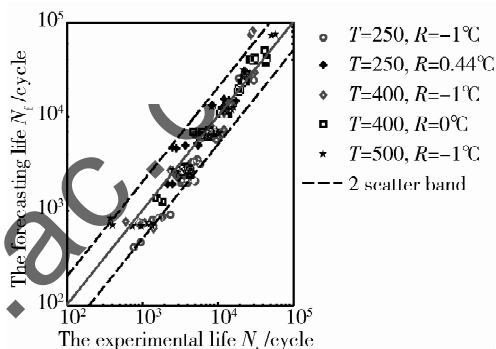
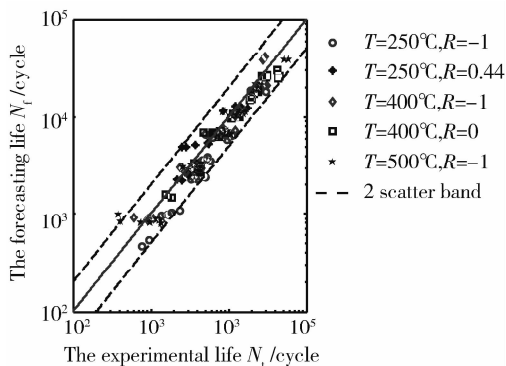


图3 GH4133 合金预测寿命分散带

Fig. 3 The life prediction scatter band of GH4133 material

图4 文献<sup>[9]</sup>对GH4133合金预测寿命分散带Fig. 4 The life prediction scatter band of GH4133 material in documents published<sup>[9]</sup>

预测方法与本工作建立的方法进行比较,并与文献中涡轮盘的试验结果进行对比分析。

由于获取的GH4133合金疲劳性能数据的失效判据是试样断裂,因此,在预测涡轮盘裂纹萌生寿命时,要对合金的预测寿命 $N_f$ 除以一个修正系数,一般取修正系数为1.5进行修正得到涡轮盘裂纹萌生寿命 $N_p$ <sup>[9]</sup>。

文献<sup>[9,15]</sup>给出了几个涡轮盘的试验结果及有限元应力分析结果,表 1 为应用文献<sup>[15]</sup>中的相关数据和涡轮盘预测寿命的对比。

表 1 涡轮盘寿命预测结果  
Table 1 The predicted lives of the disk

Predicting method	Characteristic parameter	Forecasting	Correction	Experimental	Relative error $\frac{N_p - N_t}{N_t} / \%$
		life $N_f / \text{cycle}$	life $N_p / \text{cycle}$	life $N_t / \text{cycle}$	
Morrow linear elastic stress correction		13285	8857		10.7
Universal slope method	$\sigma_{\max} = 909.6$	12669	8446		5.6
Morrow total strain correction	$\sigma_m = 463.2$	12877	8585		7.3
Gerber elastic stress curvature correction	$\Delta \varepsilon_i = 0.00584155$	25105	16737	8001	109.0
Critical plane approach(SWT)	$\sigma_b = 1126$ $\varphi = 0.31$	7025	4683		-41.0
The document model <sup>[12]</sup>	$\varepsilon_w = 0.005345$	13657	9105		13.8
The textual model		11934	7956		-0.6

Note: Calculating life in the table with the Masson-Coffin correction formula,  $E = 189700$ ,  $b = -0.1653$ ,  $c = -1.2152$ ,  $\sigma'_f = 3310$ ,  $\varepsilon'_f = 32.1384$ ; The unit of stress and elastic modulus is MPa.

图 5 给出了应用不同方法对文献<sup>[15]</sup>提供的涡轮盘寿命预测值与试验平均值的比较,可以看出本工作方法对涡轮盘寿命的预测精度更高。

文献<sup>[9]</sup>对三个涡轮盘进行了试验,文献中考虑到危险部位的数目对涡轮盘寿命的影响后,对预测值进行了修正,按照文献<sup>[9]</sup>的方法对预测寿命二次修正后的寿命为  $N_z$ 。表 2 给出了几种预测方法与文献<sup>[9]</sup>中试验结果的相关数据。

图 6 给出了应用不同方法对文献<sup>[9]</sup>提供的涡轮盘寿命预测值与试验平均值的比较图,图 7 为本工作提出的 Walker 简化模型寿命预测值与试验值对比图。

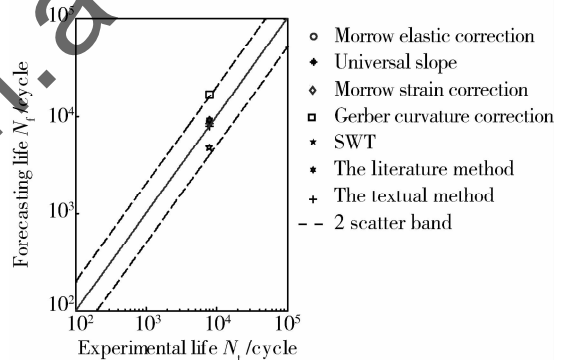


图 5 涡轮盘寿命预测值与试验平均值的对比  
Fig. 5 turbine disk's life prediction results and test mean value

表 2 涡轮盘寿命预测结果  
Table 2 The predicted lives of the disk

Predicting method	Characteristic parameter	Forecasting	Correction	Secondary	Experimental	Relative error $\frac{N_z - N_t}{N_t} / \%$
		life $N_f / \text{cycle}$	life $N_p / \text{cycle}$	correction life $N_z / \text{cycle}$	life $N_t / \text{cycle}$	
Morrow linear elastic stress correction		19178	12785	5880		47.8
Universal slope method	$\sigma_{\max} = 874$	28035	18690	8596		116.0
Morrow total strain correction	$\sigma_m = 402$	18563	12375	5692	1# 4764	
Gerber elastic stress curvature correction	$\Delta \varepsilon_i = 0.005469$	45262	30175	13879	2# 3493	43.1
Critical plane approach(SWT)	$\sigma_b = 1126$ $\varphi = 0.31$	7675	5117	2354	3# 3679	248.8
The document model <sup>[9]</sup>	$\varepsilon_w = 0.005277$	14666	9777	4497	Mean value 3979	-40.8
The textual model		12603	8402	3865		-2.9

Note: Calculating the life in the table with the Masson-Coffin correction formula,  $E = 173000$ ,  $b = -0.1457$ ,  $c = -1.1146$ ,  $\sigma'_f = 2525$ ,  $\varepsilon'_f = 12.59$ ; The unit of stress and elastic modulus is MPa.

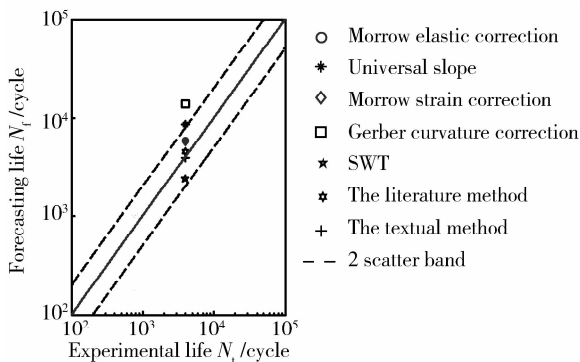


图6 涡轮盘寿命预测值与试验均值比较

Fig. 6 Turbine disk's life prediction results and test mean value

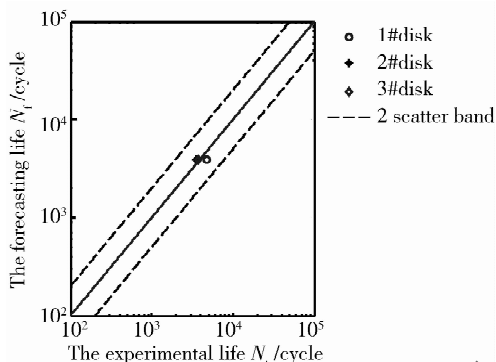


图7 预测值与试验值对比

Fig. 7 The predicted values and experimental values

综合分析图5、图6可知,在上述的几种修正方法中, Gerber弹性应力曲率修正方法预测的寿命相对偏高,预测值偏危险,临界平面法(SWT)预测的寿命值相对偏保守;总体来说,与其他寿命模型相比,本工作的简化模型预测精度较好,更加简单明了,同时也更易于工程化应用。

## 4 结论

(1)提出了简化 Walker 应变寿命模型  $\varepsilon_w = a \cdot b \lg N_f + c$ 。简化模型不仅不需要进行平均应力修正,而且能够综合考虑温度对疲劳寿命的影响,在很大程度上减小了 Walker 应变寿命公式的复杂性。

(2)简化模型对 GH4133 合金的疲劳寿命预测结果基本分布在试验均值寿命的两倍分散带之内,具有较高的预测精度。

(3)通过采用不同预测方法对涡轮盘的寿命预测及试验值对比分析,在几种常用的修正方法中,弹性应力曲率法预测的寿命值相对较高,预测值偏危

险;临界平面法(SWT)预测的寿命值相对较低,预测值偏保守;本工作的简化模型预测精度较好,更加简单明了。

## 参考文献:

- [1] 杨兴宇, 阎晓军, 赵福星. 某型航空发动机涡轮盘低压循环疲劳寿命分析[J]. 机械强度, 2004, 26(增刊): 229 - 233.  
(YANG X Y, YAN X J, ZHAO F X. Low cycle fatigue life of an aeroengine gas turbine disk [J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(Suppl): 229 - 233.)
- [2] 杨剑秋, 陆山. 中长寿命轮盘应力寿命及可靠性分析方法[J]. 航空动力学报, 2007, 22(6): 991 - 995.  
(YANG J Q, LU S. Methods for stress based life and its reliability analyses of discs with medium-long and long life [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(6): 991 - 995.)
- [3] 杨庆雄. 局部应力应变法寿命计算中材料疲劳特性选用的评论[C]//第五届全国疲劳学术会议论文集, 西北工业大学, 1991: 230 - 235.
- [4] 牟园伟, 陆山. 轮盘低周疲劳概率寿命预估模型[J]. 推进技术, 2012, 33(2): 288 - 292.  
(MU Y W, LU S. Low cycle fatigue probabilistic life prediction models for fan disk [J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33(2): 288 - 292.)
- [5] 李建国, 叶新农, 徐可君. 涡扇发动机寿命管理研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2005, 20(4): 468 - 472.  
(LI J G, YE X N, XU K J. Life management research of military turbofan engine [J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2005, 20(4): 468 - 472.)
- [6] SATTAR S A, SUNDT C V. Gas turbine engine disk cyclic life prediction [J]. J Aircraft, 1975, 12(4): 360 - 365.
- [7] WALKER K. The Effects of Stress Ratio During Crack Propagation and Fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum; Effect of Environment and Complex Load History on Fatigue Life [R]. West Conshohocken: American Society Testing and Materials, STP 462, 1970.
- [8] JASKE C E, FEDDERSEN C E, DAVIS K B, et al. Analysis of Fatigue, Fatigue Crack Propagation, and Fracture Data [R]. NASA CR-132332, 1973.
- [9] 王卫国. 轮盘低循环疲劳寿命预测模型和试验评估方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [10] STARR K K, WALKER C R. Failure Analysis Handbook [R]. ADA219747, 1989.
- [11] 杨俊, 谢寿生, 祁圣英, 等. 基于等效应变的轮盘低循环疲劳寿命预测[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2010, 11(6): 12 - 16.  
(YANG J, XIE S H, QI S Y, et al. Disk low cycle fatigue

- life prediction based on equivalent strain[J]. Journal of Air Force Engineering University ( Natural Science Edition ), 2010, 11(6):12 - 16. )
- [12] 辛朋朋, 胡绪腾, 宋迎东. 基于临界距离理论的 TC4 合金缺口试样低循环疲劳寿命预测[J]. 航空动力学报, 2012, 27(5):1105 - 1112.  
(XIN P P, HU X T, SONU Y D. LCF life prediction for TC4 based on theory of alloy notched specimens critical distance[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(5): 1105 - 1112. )
- [13] 苏金明, 阮沈勇, 王永利. MATLAB 工程数学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [14] 北京航空材料研究所. 航空发动机设计用材料数据手册[M]. 中国航空发动机总公司, 1990.
- [15] 高阳, 白广忱, 张瑛莉. 涡轮盘多轴低循环疲劳寿命可靠性分析[J]. 航空学报, 2009, 30(9):1678 - 1682.  
(GAO Y, BAI G C, ZHANG Y L. Reliability analysis of multiaxial low cycle fatigue life for turbine disk[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(9):1678 - 1682. )

## Low Cycle Fatigue Life Prediction of Turbine Disks Based on Walker Equivalent Strain

ZHANG Guo-qian, ZHAO Ming, ZHANG Sheng, SHANG Ti-song

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** A simplified Walker strain-life prediction model was proposed based on the research of the change of the Walker strain-life prediction model in the  $10^3 \sim 10^5$ . The low cycle fatigue life (LCF) of the disk was predicted by using the simplified model. The experimental data of GH4133 material were used to verify the simplified model, and the fatigue life of disk was predicted by using different methods. The prediction value was also compared with the experimental results. The results show that the simplified model has a higher prediction accuracy. The prediction lives of turbine disks are in good agreement with the experimental results, and the simplified model is simple and easier for engineering applications.

**Key words:** low cycle fatigue ( LCF ); Walker equivalent strain; life prediction; turbine disks