

基于等效应变的轮盘低循环疲劳寿命预测

杨 俊¹, 谢寿生¹, 祁圣英², 董红联²

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 西安航空发动机集团有限公司, 陕西 西安 710021)

摘 要:针对轮盘低循环疲劳载荷非对称及其主要寿命区限,提出一种简化的等效应变寿命预测模型,对某型发动机高压压气机 I 级盘进行了低循环疲劳寿命预测。补充了 1Cr11Ni2W2MoV 材料轴向应变控制的低循环疲劳试样试验,设计了高压压气机 I 级盘低循环疲劳试验件,在旋转试验器上进行了轮盘的低循环疲劳试验,得到 3 个盘的平均低循环疲劳试验寿命为 4 280 个试验循环。通过与试验寿命的比较,等效应变寿命预测误差为 41.8%, Manson - Coffin 预测误差为 99.2%。结果表明:简化的等效应变寿命预测方法是有效的,而且对试验盘的寿命预测精度比 Manson - Coffin 预测模型高。

关键词:轮盘;低循环疲劳;寿命预测;等效应变;旋转试验器;Manson - Coffin 模型

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.06.003

中图分类号: V231.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)06-0012-05

低循环疲劳破坏是影响和限制轮盘安全使用的最主要因素,因此,发展和验证轮盘低循环疲劳寿命的预测方法尤为重要。目前国内外普遍采用 Manson - Coffin 模型^[1-2]进行轮盘低循环疲劳寿命预测,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。针对轮盘低循环疲劳载荷非对称及其主要寿命区限($10^3 - 16^5$)的特点,本文提出一种简化形式的等效应变寿命预测方法对轮盘的低循环疲劳寿命进行预测。补充了 1Cr11Ni2W2MoV 材料轴向应变控制的低循环疲劳试验,设计了某高压压气机 I 级盘低循环疲劳试验件,在轮盘旋转试验器上完成了 3 个盘的低循环疲劳试验,验证了所提出的低循环疲劳寿命预测方法的有效性。

1 等效应变寿命预测模型及其简化形式

1.1 等效应变预测模型

等效应变定义了一个包含平均应力的等效应变参数 ε_{eq} ^[3-5],这恰恰可以解决 Manson - Coffin 公式需平均应力修正的问题。等效应变参数 ε_{eq} :

$$\varepsilon_{eq} = (2\varepsilon_a)^m \left(\frac{\sigma_{max}}{E} \right)^{1-m} \quad (1)$$

式中: m 为材料常数; σ_{max} 为最大应力; E 为弹性模量; ε_a 为应变幅值。在等效应变定义的基础上,用反双曲正切函数拟合疲劳试验数据^[3]:

$$\lg N_f = A_0 + A_1 \arctan h \left[\lg(\varepsilon_e \varepsilon_u / \varepsilon_{eq}^2) / \lg(\varepsilon_u / \varepsilon_e) \right] \quad (2)$$

式中: A_0, A_1 为回归常数; ε_u 为对应于 1/4 循环时的应变,由 $\varepsilon_u = \varepsilon_{eq} \left|_{N=10} + 0.0025$ 确定; ε_e 对应于疲劳极

* 收稿日期:2010-04-28

基金项目:国防综研基金资助项目(10116-2004);西航集团“十一五”可靠性科研基金项目(XAEC-JPS-JHB-1005-0031)

作者简介:杨俊(1979-),男,山西太原人,博士生,主要从事航空发动机强度寿命研究;

E-mail: yangjunky_013@163.com

谢寿生(1959-),男,四川成都人,教授,博士生导师,主要从事航空发动机推进系统状态监控与故障诊断、发动机零部件强度寿命与失效分析研究。

限时的应变,由 $\varepsilon_e = \varepsilon_{eq} \Big|_{N=10^8} - 0.0005$ 确定。图 1 给出了 $\varepsilon_{eq} - N_f$ 曲线的形状,称为等效应变寿命曲线。等效应变寿命曲线适用于各个寿命区且不需要做平均应力修正。但式(2)中共有 4 个材料常数,拟合比较复杂,限制了等效应变寿命预测模型的广泛应用^[6-7]。

仔细研究式(2)可以发现,导致等效应变寿命预测模型拟合比较复杂的主要原因在于该模型兼顾了比较宽广的疲劳寿命区限 $10^1 - 10^7$ 。在一定的疲劳寿命区限内,比如 $10^3 - 10^5$ (图 1 两条虚线之间)等效应变寿命曲线的变化趋势比较简单,可以采用更简洁的数学形式进行试验数据拟合,而航空发动机轮盘低循环疲劳失效的寿命区限基本上处于 $10^3 - 10^5$ 范围内。因此,本文提出采用如下简化形式的等效应变寿命预测模型来拟合疲劳试验数据,式中 a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 为拟和常数:

$$\varepsilon_{eq} = a_0 + a_1 \lg(N_f) + a_2 \lg(N_f)^2 + a_3 \lg(N_f)^3 + a_4 \lg(N_f)^4 \quad (3)$$

1.2 1Cr11Ni2W2MoV 材料等效应变寿命预测模型的拟合

等效应变 ε_{eq} 包含平均应力,不需做平均应力修正。是由于从式(1)看出,等效应变为双参数,即 ε_a 和 σ_{max} ,通过这 2 个参数能确定应变水平。盘类零件工作过程中承受的载荷都是不对称的,为了更好地模拟零件的工作状态,需要不同应变比下的试验值来进行等效应变的拟和,对于拟和曲线和预测不同应变比下的零件的寿命更加可信。

1Cr11Ni2W2MoV 合金盘坯轴向应变控制在 $200\text{ }^\circ\text{C}$, $R_e = -1$ 的低循环疲劳试验数据来自文献[8]。本文补充做了 $R_e = -0.5$ 和 $R_e = 0$ 的疲劳试验数据。试验用试棒按 GB/T15248-2008^[9] 进行加工,试棒尺寸见图 2。疲劳试验机型号为 MTS。取 $m = 0.55$ ^[10] 时,等效应变寿命散点图及拟和曲线见图 3。可得 1Cr11Ni2W2MoV 材料在 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 等效应变寿命预测模型为:

$$\varepsilon_{eq} = 0.16 - 0.13 \lg(N_f) + 0.043 \lg(N_f)^2 - 0.0068 \lg(N_f)^3 + 0.00041 \lg(N_f)^4 \quad (4)$$

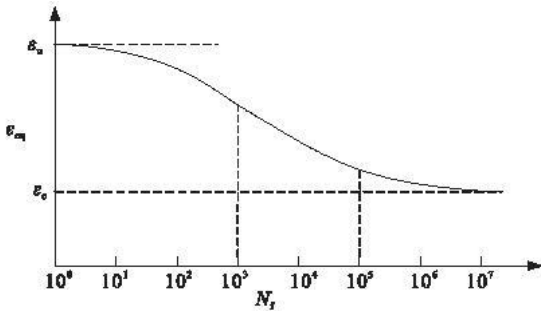


图 1 $\varepsilon_{eq} - N_f$ (等效应变寿命曲线)

Fig. 1 $\varepsilon_{eq} - N_f$ (Equivalent strain - life curve)

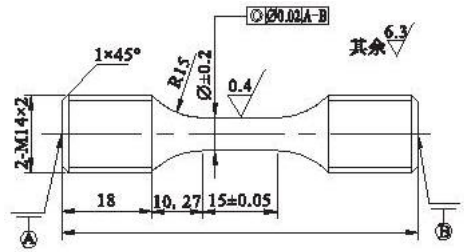


图 2 低循环疲劳试样

Fig. 2 LCF specimen

1.3 等效应变寿命预测模型预测精度验证

为了定量评定和验证本文提出的等效应变寿命预测模型简化形式的预测精度,定义寿命散度系数 $S = N_f/N_i$,其中 N_f 为预测寿命, N_i 为试样试验寿命。

根据式(4),对试验的 35 个试样进行了寿命预测,预测结果见图 4,由图可见,有 33 个试样的寿命预测精度在试验寿命的 2 倍范围之内,只有 3 个试样的预测寿命略微超过 2 倍,其寿命散度系数 S 分别为 0.48, 0.48, 0.49。可见,本文提出的等效应变寿命预测模型具有较高的低循环疲劳寿命预测精度。

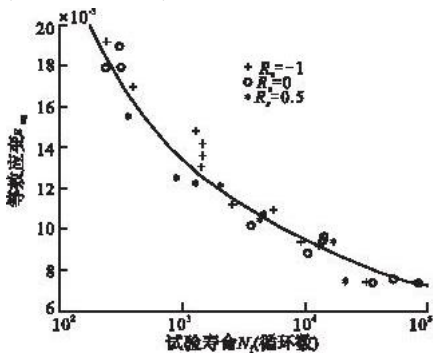


图 3 等效应变寿命散点图及曲线拟和

ig. 3 Equivalent strain - life curve for 1Cr11Ni2W2MoV

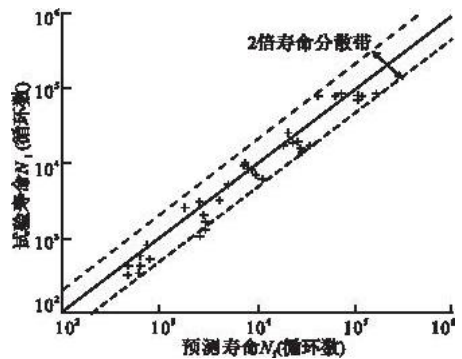


图 4 预测寿命与试验寿命的相关性

ig. 4 Disk LCF relativity between the predicted and test result

2 高压压气机 I 级盘弹塑性应力应变分析

由于该盘具有周期对称性,故而只对 1/47 盘进行分析。采用商业有限元软件 Abaqus,使用 8 节点线性六面体单元 C3D8,单元数 32 438,这里分析了轮盘试验器循环载荷状态。转速为 700-13 750-700(r/min)三角谱,温度场是均匀的,取 60 °C、轴向位移为 0-0.587 mm-0。为更准确地求解销钉孔边的应力应变,还需要分析销钉与盘的接触情况。由于试验轮盘采用工艺叶片,故而建立了“盘-销-工艺叶片”模型,分析了“盘-销-工艺叶片”系统在试验器循环状态下的接触问题。

计算结果(见图 5)表明,最大应力点出现在轮盘的外缘前法兰销钉孔边 12 点和 6 点方向,说明该方向是轮盘在循环工作时的危险部位,疲劳裂纹有可能从这里萌生。经历 2.5 个循环后危险点处的应力应变循环曲线见图 6。

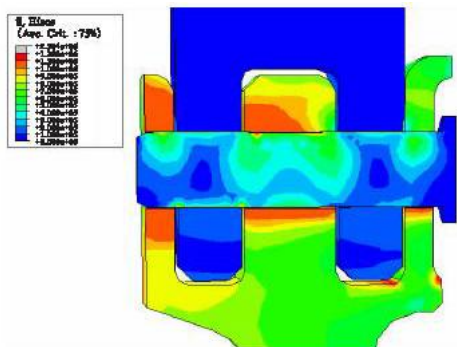


图 5 试验器循环下弹塑性计算得到的等效应力云图

Fig. 5 Equivalent stress of tester cycle elastic - plastic analysis

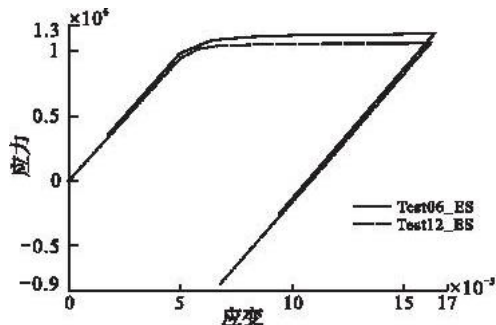


图 6 试验器循环下销钉孔边的应力应变

Fig. 6 Stress - strain beside the Pin - hole of tester cycle

3 高压 I 级盘低循环疲劳试验验证

3.1 Manson - Coffin 公式预测

为了与本文提出的预测模型进行对比,首先使用 Manson - Coffin 公式对轮盘进行寿命预测。材料数据手册中未给出该材料在 300 °C 以下的低循环疲劳特性,但给出了在常温下和 200 °C 下的拉伸强度极限、断裂截面收缩率和弹性模量^[11],可以利用这 3 个参数,采用 Manson 4 点法^[12],求出在 60 °C 下的 $\epsilon - N$ 关系:

$$\epsilon_t/2 = 0.0259(N_f)^{-0.139} + 1.255(N_f)^{-0.650} \quad (5)$$

式中 ϵ_t 为总应变。根据弹塑性分析得到应变幅值及式(5)对轮盘进行寿命预测,并通过 Goodman 方法对应力和应变进行修正,修正方法参见文献[13]。本文提出的简化的等效应变模型预测首先进行弹塑性应力应变分析,得到轮盘最危险点处应变幅值和最大应力,通过式(1)计算该点处的等效应变值,最后由等效应变值和式(4)求得轮盘最危险点处的寿命值,这个值即可以代表轮盘的低循环疲劳寿命。2 种方法寿命预测结果见表 1。

表 1 危险点的应力应变幅值及寿命预测

Tab. 1 Stress - strain range and predicted life for dangerous position

载荷状态	危险点位置	应变幅值	最大应力 /MPa	Manson - Coffin 模型预测		简化的等效应变模型预测	
				预估寿命	修正寿命	等效应变	预估寿命
试验器循环	12 点	0.009 25	1 081	14 676	10 448	0.010 4	8 345
	6 点	0.009 70	1 110	12 567	8 682	0.010 9	6 174

3.2 高压 I 级盘低循环疲劳试验

试验用高压 I 级盘工艺叶片,当多个销钉孔有明显可见裂纹时,结束试验。先进行 1 件高压 I 级轮盘(1 号盘)的低循环疲劳试验,再进行 2 件高压 I 级轮盘(2、3 号盘)的低循环疲劳试验。暂且将最后一次检查时未发现裂纹的循环数作为轮盘的裂纹萌生寿命。统计得到 3 个试验轮盘寿命循环数为:1 号盘:4 670;2 号盘:3 820;3 号盘:4 350。平均寿命循环数为 4 280。

3.3 预测值与试验值的比较

3.3.1 试验值

由 00-970-11 部^[14]方法,首先得到寿命散度系数 $Y=3.25$,然后根据 $F_r = (\sum_{i=1}^n N_i/n)/Y$ 计算得出安全循环寿命为 1 336 个标准循环。圆整后为 1 340 个标准循环。式中: N_i 试验寿命; n 为子样个数; Y 为寿命散度系数。

3.3.2 预测值

根据有限元计算结果,在试验器循环状态模拟轴向力情况下,前法兰销钉孔 6 点处是轮盘的最薄弱点,根据 Manson-Coffin 公式,即式(5),该处的寿命预测为 8 682 个循环,而本文提出的简化的等效应变预测模型,即式(4),预测寿命为 6 174 个循环,见表 1。可以得到轮盘安全循环寿命分别为 $8\ 682/Y=2\ 671$, $6\ 174/Y=1\ 900$,数据圆整后分别为 2 670 个及 1 900 个标准循环。2 种预测方法与试验结果误差对比见表 2,可以看出本文提出的简化的等效应变预测模型对轮盘的寿命预测精度要比 Manson-Coffin 预测模型高。

表 2 高压 I 级盘安全循环寿命
Tab.2 Safty cycle life of HPC disk I

方法	试验结果	Manson-Coffin 预测结果	等效应变预测结果
安全循环寿命	1 340	2 670	1 900
误差	-	99.2%	41.8%

4 结束语

本文针对轮盘低循环疲劳载荷非对称及其主要寿命区限,提出一种简化的等效应变寿命预测模型,补充了 1Cr11Ni2W2MoV 材料轴向应变控制的低循环疲劳试验,得到了该材料的等效应变寿命预测模型;设计了高压压气机 I 级盘低循环疲劳试验件,在旋转试验器上进行了轮盘的低循环疲劳试验,得到 3 个盘的低循环疲劳试验寿命。通过试验寿命和预测寿命的比较得出这种简化的等效应变寿命预测方法是有效的,而且对试验盘的寿命预测精度比 Manson-Coffin 模型高。该方法可望推广应用于其它型号发动机轮盘的低循环疲劳寿命预测研究中,不仅可以提高轮盘低循环疲劳寿命的预测精度,而且可为企业节省大量的试验费用。

参考文献:

- [1] Manson S S. Behaviour of Materials under Condition of the Thermal Stress[R]. NACA TN-2933,1954.
- [2] Coffin D P. A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on A Ductile Metal[J]. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers,1954,76:931-950.
- [3] 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.
- [4] Shepherd D P. The Prediction of Fatigue Life for Arbitrary Geometries from the Statistical Analysis of Plain Specimen Data[R]. NASA CP-211682,2002.
- [5] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
YAO Weixing. Fatigue Life Prediction of Structures[M]. Beijing: Defence Industry Press,2003. (in Chinese)
- [6] 王卫国. 罗罗德国公司轮盘强度和寿命设计方法[G]. 中国一航发动机事业部 JET 技术交流文集. 北京:国防工业出版社,2004:113-118.
WANG Weiguo. Disk Intensity and Life Design Methods of RR Germany Company[G]. JET Technical Exchanges of AVIC I Ministry of Business. Beijing: Defence Industry Press,2004:113-118. (in Chinese)
- [7] 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. 西安:西北工业大学出版社,1991:230-235.
YANG Qingxiong. Review of Choose of Material Fatigue Properties in Local Stress-strain Approach Life Calculating[C]//Symposium of 5th Meeting on Fatigue. Xi'an:Northwesten Polytechnical University Press,1991:230-235. (in Chinese)
- [8] 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.
WANG Weiguo. Research on Prediction Model for Disc LCF Life and Experiment Assessment Methodology[D]. Nanning: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2006. (in Chinese)
- [9] GB/T 15248-2008. 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
GB/T 15248-2008. The Test Method for Axial Loading Constant-amplitude Low-cycle Fatigue of Metallic Materials[S]. Beijing: Chinese Standard Press,2008. (in Chinese)
- [10] 王卫国,古远兴,卿华,等. 轮盘低循环疲劳寿命预测方法及试验验证[J]. 航空动力学报,2006,21(5):862-866.
WANG Weiguo, GU Yuanxing, QING Hua, et al. Investigation of Disk LCF Life Prediction and Its Experimental Verification[J]. Journal of Aerospace Power, 2006,21(5):862-866. (in Chinese)

- [11] 黄志豪. 航空发动机设计用材料数据手册[M]. 北京:国防工业出版社,1993.
HUANG Zhihao. Manual of Material Data for Aero - engine Design[M]. Beijing:Defence Industry Press,1993. (in Chinese)
- [12] 吕文林. 航空发动机强度计算[M]. 北京:国防工业出版社,1988.
LÜ Wenlin. Aero - engine Intensity Calculation[M]. Beijing:Defence Industry Press,1988. (in Chinese)
- [13] 谢济洲. 低循环疲劳手册[M]. 北京:北京航空材料研究所,1991.
XIE Jizhou. Manual of Low - cycle Fatigue[M]. Beijing:Beijing Institute of Aeronautical Materials,1991. (in Chinese)
- [14] DEF STAN 00 - 971. General Specification for Aircraft Gas Turbine Engines[S]. UK:Ministry of Defense,1987.

(编辑:徐敏)

Disk Low Cycle Fatigue Life Prediction Based on Equivalent Strain

YANG Jun¹, XIE Shou - sheng¹, QI Sheng - ying², DONG Hong - lian²

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038 China; 2. Xi'an Aero - engine (Group) Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: A simplified equivalent strain model is presented to predict the disk Low Cycle Fatigue (LCF) life aimed at unsymmetrical loads and the main life regions. Using this model, the LCF life of the first high - pressure compressor disk is predicted. A series of axial strain - controlled LCF tests of 1Cr11Ni2W2MoV bar specimens are conducted. Then an experimental disk is designed, and the LCF test of the rotor is carried out on the spin test rig. The average LCF test life of three disks, 4 280 test cycles, is obtained. Compared with the test life, the prediction error of equivalent strain model is 41.8%, and that of Manson - Coffin model is 99.2%. The result indicates that the disk LCF life prediction method based on the equivalent strain is effective, and is higher than the Manson - Coffin method in accuracy of life prediction.

Key words: disk; low cycle fatigue (LCF) life; life prediction; equivalent strain; spin test rig; Manson - Coffin model

“国防空天信息前沿技术研讨会”在西安召开

空军景文春副司令员出席并讲话

2010年10月24日,空军工程大学电讯工程学院承办的“国防空天信息前沿技术研讨会”在西安召开。中航科工集团第三研究院刘尔琦院长主持开幕式,大会主席李德毅院士、大学张洪贺院长分别致辞,空军景文春副司令员作了讲话。大学杨晓铁副校长、科研部付全喜部长、学院吴耀光院长、吕建宏政委等出席了开幕式。

此次研讨会由中国宇航学会、空军工程大学、中国航天科技集团公司、中国航天科工集团公司主办,旨在聚集国内国防领域高等院校、国防工业研究单位及相关科研企业中从事空天信息技术研究及工程应用的领军专家和科研人员,研讨我国空天信息技术发展及应用的途径和方向,为促进空军“空天一体”战略转型目标的实现提供技术与理论支撑。

研讨会为期3天,近百家单位的300余名国内信息技术领域的院士、知名专家及学者共聚一堂,围绕空天一体信息系统、天基信息系统关键技术、天基预警探测技术及应用、临近空间信息系统、空间光通信、空间信息安全与防护等技术作专题报告并进行交流研讨。李德毅院士、张洪贺教授、姜景山院士、杨千里教授、毛二可院士、张乃通院士、吴曼青院士等国内领军专家出席研讨会并作了重要报告。空军工程大学电讯工程学院网络工程系赵尚弘主任、导航工程系吴德伟主任等专家也在会上作了报告。学院相关专业教员、研究生聆听了研讨报告后纷纷表示,研讨会使大家开阔了眼界,了解了空天信息领域前沿技术,对学术研究的深入开展大有裨益。研讨会召开正值国家“十二五”项目论证关键时期,大会密切结合国家重大国防科技项目需求展开研讨,引领我国空天信息技术的发展方向,将对推动空军战略转型有着重要的积极意义。大学站在新的起点上确立了“创建国内一流大学”目标,此次研讨会的主办,将有效提升大学在国防空天信息技术发展与研究方面的影响力,扩大大学知名度。当前,学院着眼空军战略转型需求,大力推进创新发展,加大了学科专业整合力度,承办此次研讨会,将进一步深化学院在空天信息技术方面的学术研究,并促进学院“空天信息工程”专业稳步发展。

(电讯工程学院 田言涛,张 辉报道)