

DOI: 10. 11973/jxgccl240314

# 基于载荷加载历程与平均应力修正 Aeran 模型的疲劳寿命预测

王柳璎<sup>1</sup>, 毕俊喜<sup>1,2</sup>, 侯伟<sup>3</sup>, 张国斌<sup>4</sup>, 孙鹏文<sup>2</sup>, 王妍<sup>1</sup>

(内蒙古工业大学1. 航空学院, 2. 机械工程学院, 呼和浩特 010051; 3. 西安航空学院飞行器学院, 西安 710077; 4. 呼和浩特众环工贸股份有限公司, 呼和浩特 010051)

**摘要:** 针对变幅载荷作用下结构的疲劳损伤和寿命预测问题, 基于非线性累积损伤理论, 引入载荷交互作用因子和与应力水平相关的实时载荷函数对 Aeran 模型进行修正, 建立了考虑载荷加载历程(包括载荷交互作用和载荷加载顺序)与平均应力的 Aeran 非线性疲劳累积损伤模型, 采用两级加载下 30CrMnSiA 钢、45 钢和 16Mn 钢的疲劳试验数据进行了验证, 并与考虑载荷交互作用的改进 Aeran 模型和 Miner 模型进行了对比。结果表明: 采用修正的 Aeran 模型预测得到的归一化疲劳寿命与归一化试验值集中分布在  $x=y$  参考线附近, 验证了模型的准确性。在 3 种预测模型中, 修正 Aeran 模型预测寿命的误差因子绝对值的平均值和标准差最小, 分别为 0.042 和 0.131, 比改进 Aeran 模型分别小 0.021 和 0.035, 比 Miner 模型分别小 0.011 和 0.099。

**关键词:** 寿命预测; Aeran 模型; 非线性疲劳累积损伤; 载荷加载历程; 平均应力

**中图分类号:** TH114; O346.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3738(2025)05-0115-06

## 0 引言

绝大多数结构材料在实际服役过程中常承受某种形式的循环交变载荷。在循环交变载荷作用下, 材料会产生疲劳累积损伤, 导致性能退化, 进而引发疲劳失效<sup>[1-2]</sup>。材料在疲劳裂纹萌生前期无明显特征, 这增加了对疲劳裂纹进行预测和检测的难度<sup>[3-4]</sup>。

疲劳累积损伤分析是用于评估材料或结构在长期循环加载下疲劳性能和寿命的技术, 广泛应用于工程领域<sup>[5]</sup>。但是疲劳累积损伤机理复杂, 准确高效地计算材料的疲劳寿命较困难, 通常需要进行大量材料性能试验。非线性累积损伤理论能够较准确地计算材料在多级载荷下的累积损伤, 精度高、适用性广, 在涡轮叶片、汽轮机转子和桥梁结构等关键部件的疲劳寿命预测中占据重要地位<sup>[6-7]</sup>。基于非线性累积损伤理论, 针对结构在变幅载荷下的疲劳累积损伤问题, 学者们从应力应变状态、疲劳寿命曲线

以及损伤累积规律等方面出发提出了多种疲劳损伤模型。AERAN 等<sup>[8]</sup>构建的累积损伤模型(Aeran 模型)形式简单, 仅依赖材料的疲劳寿命( $S-N$ )曲线, 无需其他多余物理参数, 但该模型未考虑各级载荷间交互作用的影响, 预测精度受限。AERAN 等<sup>[9]</sup>和余奥迪<sup>[10]</sup>考虑了载荷间交互作用的影响, 分别引入载荷交互作用因子  $\mu_{i+1}$  (相邻两级应力幅比值的平方) 和  $\gamma_{i,i+1}$  (相邻两级应力幅比值) 对 Aeran 模型进行改进, 该改进模型的预测精度有所提高; 刘源<sup>[11]</sup>考虑了材料的记忆性能退化机制, 通过引入衰减交互因子量化了材料在循环载荷下的性能退化对 Aeran 模型进行了修正, 提升了在变幅载荷、材料退化机制等复杂工况下材料疲劳寿命的预测精度。

上述修正模型通过引入载荷交互作用因子或衰减交互因子对 Aeran 模型进行了优化, 但由于载荷对材料的损伤具有不可逆性, 仅靠载荷交互作用因子等难以全面描述载荷加载历史。当各工作状态下的载荷幅较高时, 材料内部会产生更大的应力幅、更高的最大应力和平均应力等, 加速材料损伤累积, 从而缩短使用寿命。因此, 疲劳寿命预测必须充分考量不同工况下载荷幅变化对材料损伤的影响。同时, 由于复杂服役环境和多种结构形式耦合, 单纯依赖载荷加载历程进行预测的可靠性低, 误差较大。目

收稿日期: 2024-06-24; 修订日期: 2025-03-26

基金项目: 内蒙古自治区研究生科研创新项目(KC2024037S); 2024 “蒙科聚” 创新平台科技成果落地产业化示范项目(2024MKJCGZH001); 内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目(2022YFHH0055, 2023KJHZ0008)

作者简介: 王柳璎(2000—), 女, 辽宁铁岭人, 硕士研究生

通信作者(导师): 毕俊喜教授

前,同时考虑加载历程及应力水平对材料疲劳累积损伤影响的疲劳寿命预测研究较少。

作者基于非线性累积损伤理论,引入载荷交互作用因子和与应力水平相关的实时载荷函数对Aeran模型进行修正,采用两级加载下3种钢材的疲劳试验数据对修正模型进行了验证,并与仅考虑载荷交互作用的改进Aeran模型和Miner模型的预测结果进行了对比,以期对变幅载荷下寿命的准确评估提供参考。

## 1 Aeran模型修正

### 1.1 Aeran模型

AERAN等<sup>[8]</sup>构建的以疲劳损伤演变全过程为基础的累积损伤模型如下:

$$D_i = abs \left[ 1 - \left( 1 - \frac{n_i}{N_{fi}} \right)^{\delta_i} \right] = \left( 1 - \frac{n_i}{N_{fi}} \right)^{\delta_i} - 1 \quad (1)$$

$$\frac{n_{i,res}}{N_{fi}} = \left\{ \left[ \left( 1 - \frac{n_1}{N_{f1}} \right)^{\frac{\ln N_{f2}}{\ln N_{f1}}} - \frac{n_2}{N_{f2}} \right]^{\frac{\ln N_{f3}}{\ln N_{f2}}} - \frac{n_3}{N_{f3}} \right]^{\frac{\ln N_{f4}}{\ln N_{f3}}} - \dots - \frac{n_{i-1}}{N_{f(i-1)}} \right\}^{\frac{\ln N_{fi}}{\ln N_{f(i-1)}}} \quad (4)$$

式中:  $n_{i,res}$  为材料在经历  $n_{i-1}$  次循环后,在第  $i$  级应力水平下剩余可承受的循环次数。

传统的Aeran模型形式简单,但未考虑载荷加载历程与应力水平对疲劳寿命的影响,且仅在等幅加载条件下才能较好地描述材料的疲劳损伤,不适用于变幅加载工况。

### 1.2 Aeran模型的修正思路

在变幅载荷作用下,材料损伤的产生受到当前载荷幅、载荷历史以及相邻载荷间交互作用等多方面因素的影响。针对两级循环加载,作者在考虑载荷加载顺序和交互作用的同时,兼顾平均应力效应对Aeran模型进行修正。

在先高应力再低应力(H-L)加载和先低应力再高应力(L-H)加载条件下,材料的损伤演变规律如图1所示。图中:  $D$  为损伤;  $D_{eq}$  为等效损伤;  $\sigma_1, \sigma_2$  分别为第1, 2级应力。当先进行高应力后进行低应力加载时,若仅考虑载荷加载顺序的影响,损伤曲线路径为  $OABC$ , 若同时考虑载荷加载顺序与载荷间交互作用,累积损伤进程会加快,损伤曲线向左偏移,其路径变为  $OABC_1$ ; 当先进行低应力后进行高

$$\delta_i = -1.25 / \ln N_{fi} \quad (2)$$

式中:  $D_i$  为第  $i$  级应力水平下的损伤,  $i$  取正整数;  $n_i$  为第  $i$  级应力水平对应的工作循环次数;  $N_{fi}$  为第  $i$  级应力水平下的疲劳寿命;  $a, b, s$  为绝对值函数的缩写;  $\delta_i$  为表征第  $i$  级载荷对材料损伤贡献权重的关键参数,反映了材料对载荷历史的记忆效应,通过研究前人工作以及了解材料在等幅载荷下的疲劳损伤行为而确定。

在两级加载条件下,根据等损伤原理,剩余损伤可以表示为

$$\frac{n_{2,res}}{N_{f2}} = \left( 1 - \frac{n_1}{N_{f1}} \right)^{\frac{\ln N_{f2}}{\ln N_{f1}}} \quad (3)$$

式中:  $n_{2,res}$  为材料在经历  $n_1$  次循环后在第2级应力水平下可承受的剩余循环次数。

推广到多级循环加载条件下,剩余损伤表示为

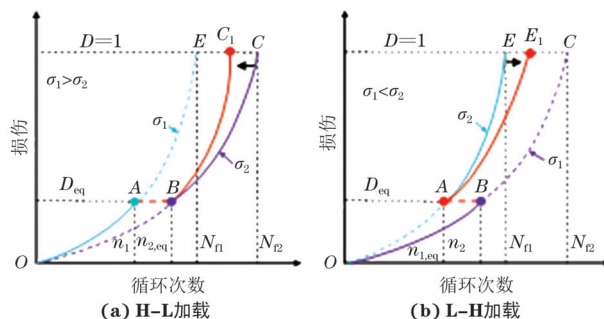


图1 两级加载条件下的损伤曲线路径

Fig. 1 Damage curve path under two-stage loading condition: (a) H-L loading and (b) L-H loading

应力加载时,若仅考虑载荷加载顺序的影响,损伤曲线路径为  $OBAE$ , 若同时考虑载荷加载顺序与载荷间交互作用,累积损伤过程具有滞后作用,损伤曲线向右偏移,其路径变为  $OBAE_1$ 。

考虑载荷加载历程时,材料的损伤可以通过调整忽略载荷加载历程时损伤的幂指数来表示。载荷交互作用的影响与邻近载荷幅的比值相关,并且载荷水平差异性越大,交互作用越显著。因此,以载荷交互作用因子作为损伤的幂指数引入到Aeran模型中,载荷交互作用因子的表达式如下:

$$\gamma_{i,i+1} = \sigma_i / \sigma_{i+1} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_i$  为第  $i$  级应力幅;  $\sigma_{i+1}$  为第  $i+1$  级应力幅。

在循环交变载荷作用下, 材料的应力水平对后续的应力应变响应有着显著影响。因此, 通过引入与平均应力和最大应力有关的实时载荷函数  $\alpha(\sigma_M, \sigma_m)$  ( $\sigma_M$  为最大应力;  $\sigma_m$  为平均应力) 来进一步修正 Aeran 模型。

### 1.3 两级加载 Aeran 模型修正

在 Aeran 模型的基础上, 考虑载荷加载历程对疲劳损伤演变的影响引入载荷交互作用因子, 考虑每一级载荷对构件造成的损伤引入与平均应力和最大应力有关的实时载荷函数, 建立的修正 Aeran 模型如下:

$$D_i = 1 - \left(1 - \frac{n_i}{N_{fi}}\right)^{\frac{1}{1-\alpha_i}} = 1 - \text{abs} \left[ 1 - \left( \frac{n_{i+1,eq}}{N_{f(i+1)}} \right)^{\frac{\gamma_{i+1,i}}{1-\alpha_i}} \right] \quad (6)$$

$$N_{fi} = \frac{1}{1-\alpha} \left[ \frac{\sigma_M - \sigma_m}{M_0(1-b\sigma_m)} \right]^{-\beta} \quad (7)$$

式中:  $\alpha_i$  为第  $i$  级应力作用下有关  $\sigma_M$  和  $\sigma_m$  的函数;  $n_{i+1,eq}$  为第  $i$  级应力水平下的等效循环次数;  $\beta, M_0, b$  均为材料常数。

根据式(7), 若最大应力和平均应力对应的疲劳极限  $\sigma_{-1}$  相等, 则在应力水平  $\sigma_i$  下的疲劳寿命  $N_{fi}$  趋近于无穷。

根据损伤的等效性, 在第 1 级应力  $\sigma_1$  作用下循环  $n_1$  次所造成的损伤相当于在第 2 级应力  $\sigma_2$  作用下循环  $n_{2,eq}$  次所造成的损伤, 则式(6)可以写为

$$D_1 = 1 - \left(1 - \frac{n_1}{N_1}\right)^{\frac{1}{1-\alpha_1}} = 1 - \text{abs} \left[ 1 - \left( \frac{n_{2,eq}}{N_{f2}} \right)^{\frac{\gamma_{2,1}}{1-\alpha_2}} \right] \quad (8)$$

两级加载条件下疲劳寿命的计算公式为

$$\frac{n_{2,res}}{N_{f2}} = 1 - \frac{n_{2,eq}}{N_{f2}} = \left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right)^{\frac{1-\alpha_2}{1-\alpha_1}\gamma_{1,2}} \quad (9)$$

研究<sup>[12-14]</sup>表明: 在 H-L 加载条件下,  $\sigma_1 > \sigma_2$ , 应满足  $\frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} < 1$ , 由式(7)得到  $1 - \alpha > 0$ , 结合

式(6)和式(9), 可得  $\frac{1-\alpha_2}{1-\alpha_1} > 1$ , 即  $\alpha_1 > \alpha_2$ ; 在 L-H 加载条件下同理得到  $\alpha_1 < \alpha_2$ ; 在等幅加载条件下,  $\frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} = 1$ , 该模型退化为 Miner 模型。通过分析可知,  $\alpha$  必须为  $\sigma_M$  的单调增函数, 因此选用的实时载荷函数如下:

$$\alpha(\sigma_M, \sigma_m) = 1 - \left[ \lg \left( \frac{\sigma_M}{\sigma_{-1}\sigma_m} \right) \right]^{-1} \quad (10)$$

则两级加载条件下的疲劳累积损伤可以表示为

$$\frac{n_{2,eq}}{N_{f2}} + \frac{n_2}{N_{f2}} = \left(1 - \frac{n_{2,res}}{N_{f2}}\right) + \frac{n_2}{N_{f2}} = \left[ 1 - \left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right)^{\frac{1-\alpha_2}{1-\alpha_1}\gamma_{1,2}} \right] + \frac{n_2}{N_{f2}} \quad (11)$$

### 1.4 多级加载 Aeran 模型修正

在多级加载条件下进行疲劳寿命预测时, 可以将每一级载荷的影响进行叠加。若将在第 1 级应力水平  $\sigma_1$  作用下循环  $n_1$  次所造成的损伤与在第 2 级应力水平  $\sigma_2$  作用下循环  $n_2$  次所造成的损伤等效成在第 3 级应力水平  $\sigma_3$  作用下循环  $n_3$  次所造成的损伤, 则三级加载条件下的累积损伤可表示为

$$\frac{n_{3,eq}}{N_{f3}} + \frac{n_3}{N_{f3}} = 1 - \frac{n_{3,res}}{N_{f3}} + \frac{n_3}{N_{f3}} = 1 - \left\{ 1 - \left[ 1 - \left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right)^{\frac{1-\alpha_2}{1-\alpha_1}\gamma_{1,2}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \right]^{\frac{1-\alpha_3}{1-\alpha_2}\gamma_{2,3}} \right\} + \frac{n_3}{N_{f3}} \quad (12)$$

当进行三级加载时, 三级加载损伤寿命的计算公式可表示为

$$\frac{n_{3,res}}{N_{f3}} = 1 - \frac{n_{3,eq}}{N_{f3}} = \left\{ 1 - \left[ 1 - \left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right)^{\frac{1-\alpha_2}{1-\alpha_1}\gamma_{1,2}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \right]^{\frac{1-\alpha_3}{1-\alpha_2}\gamma_{2,3}} \right\} \quad (13)$$

在多级加载条件下, 构件的疲劳累积损伤  $C_{i-1}$  可表示为

$$C_{i-1} = \frac{n_{i-1,eq}}{N_{f(i-1)}} + \frac{n_{i-1}}{N_{f(i-1)}} \quad (14)$$

则多级载荷下的剩余损伤寿命表示为



$$\frac{n_{i,\text{res}}}{N_{fi}} = (1 - C_{i-1})^{\frac{1-\alpha_i}{1-\alpha_{i-1}} \gamma_{(i-1),i}} \quad (15)$$

## 2 模型验证与预测误差分析

### 2.1 模型验证

采用建立的修正Aeran模型[式(9)]与仅考虑载荷间交互作用的改进Aeran模型<sup>[10]</sup>(简称改进Aeran模型)和Miner模型计算30CrMnSiA钢、45钢和16Mn钢在H-L和L-H加载顺序下的疲劳寿命,并利用文献[15-16]中这3种材料的光滑和缺口试样在两级加载条件下的疲劳试验数据进行验证。

由图2可见:建立的修正Aeran模型对30CrMnSiA钢疲劳寿命的预测结果均处于 $\pm 2$ 倍误差范围内,预测值与试验值集中分布在 $x=y$ 参考线附近;改进Aeran模型和Miner模型的预测结果不都在 $\pm 2$ 倍误差范围内,相比于改进Aeran模型和Miner模型,修正Aeran模型的预测结果更接近于试验值,其中有一个预测结果与试验值重合。修正Aeran模型的预测结果与试验结果的相对误差为0.13,相较于改进Aeran模型和Miner模型分别降低了43%,88%。

由图3可知,3种模型对45钢光滑试样疲劳寿命

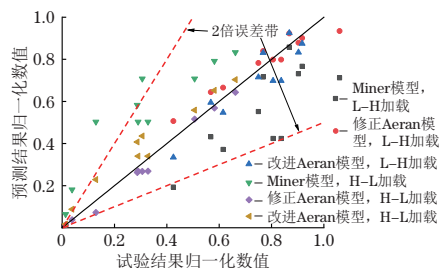


图2 不同模型预测两级加载条件下30CrMnSiA钢的归一化疲劳寿命与归一化试验结果对比

Fig. 2 Comparison of normalized prediction fatigue lives by different models and normalized test results of 30CrMnSiA steel under two-stage loading

的预测结果不都在 $\pm 2$ 倍误差范围内,对45钢缺口试样疲劳寿命的预测结果都在 $\pm 2$ 倍误差范围内,预测值与试验值集中分布在 $x=y$ 参考线附近。在3种预测模型中,修正Aeran模型的预测结果更接近试验值,与试验结果的相对误差为0.16,比Aeran模型和Miner模型分别降低了4%,20%。

由图4可见:修正Aeran模型对16Mn钢疲劳寿命的预测结果均在 $\pm 2$ 倍误差范围内,预测值与试验值集中分布在 $x=y$ 参考线附近;改进Aeran模型存在3个异类数据点,且数据点离 $x=y$ 参考线较远,

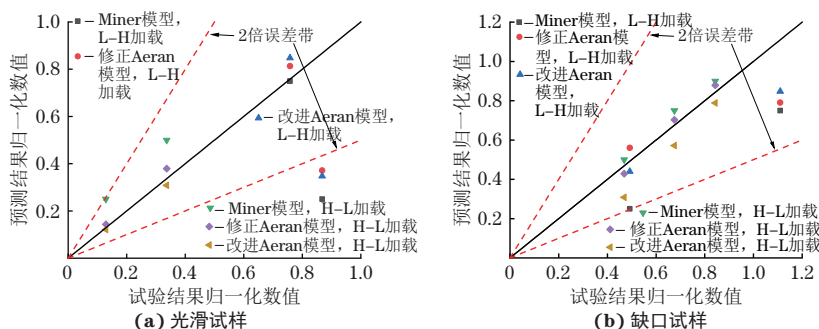


图3 不同模型预测两级加载条件下45钢光滑和缺口试样的归一化疲劳寿命与归一化试验结果对比

Fig. 3 Comparison of normalized prediction fatigue lives by different models and normalized test results of smooth (a) and notched (b) specimens of 45 steel under two-stage loading

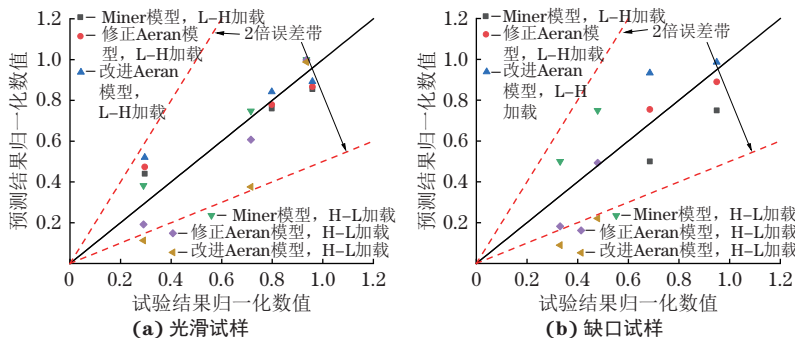


图4 不同模型预测两级加载条件下16Mn钢光滑和缺口试样的归一化疲劳寿命与归一化试验结果对比

Fig. 4 Comparison of normalized prediction fatigue lives by different models and normalized test results of smooth (a) and notched (b) specimens of 16Mn steel under two-stage loading

说明该模型预测的准确性较低;修正Aeran模型预测结果的相对误差为0.19,分别比改进Aeran模型和Miner模型减小了18%,8%。综上,修正Aeran模型比改进Aeran模型和Miner模型更可靠、更精确。

## 2.2 预测误差分析

为了对比建立的修正Aeran模型、改进Aeran模型及Miner模型的疲劳寿命预测效果,引入误差因子进行疲劳寿命预测误差分析,计算公式如下:

$$P_{\text{error}} = \frac{n_{p,i}}{N_{fp,i}} - \frac{n_{t,i}}{N_{ft,i}} \quad (16)$$

式中:  $P_{\text{error}}$  为误差因子;  $\frac{n_{p,i}}{N_{fp,i}}$ ,  $\frac{n_{t,i}}{N_{ft,i}}$  分别为归一化处理后预测和试验得到的第*i*级应力水平下的疲劳寿命。

由图5可知,针对3种钢材,修正Aeran模型预测疲劳寿命的误差因子数据最集中,中位数最小,正态曲线最陡峭,误差因子绝对值的平均值和标准差最小,分别为0.042和0.131,比改进Aeran模型分别小0.021和0.035,比Miner模型分别小0.011和0.099,说明修正Aeran模型的准确性和可靠性更高。90%的修正Aeran模型预测疲劳寿命的相对误差落在±34%区间内。对比可知,Miner模型预测结果的误差最大,改进Aeran模型次之,这是因为Miner模型采用线性累积进行损伤计算,忽略了载荷加载历程的影响,而改进Aeran模型虽然考虑了载荷加载顺序,但对应力水平和疲劳极限的考虑不足。

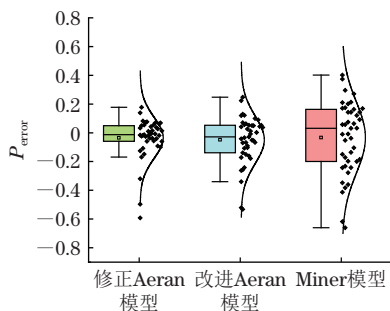


图5 不同模型预测两级加载下30CrMnSiA钢、45钢和16Mn钢疲劳寿命的误差因子

Fig. 5 Error factor of predicted fatigue life by different models of 30CrMnSiA steel, 45 steel and 16Mn steel under two-stage loading

## 3 结论

(1)引入载荷交互作用因子和与应力水平相关的实时载荷函数对Aeran模型进行修正,采用修正Aeran模型预测得到两级加载下30CrMnSiA钢、45钢和16Mn钢的归一化疲劳寿命与归一化疲劳寿命

试验值集中分布在 $x=y$ 参考线附近,相对误差比仅考虑载荷交互作用的改进Aeran模型和Miner模型低;修正Aeran模型可以更好地预测疲劳寿命。

(2)与仅考虑载荷交互作用的改进Aeran模型和Miner模型相比,考虑载荷加载历程和平均应力的修正Aeran模型更加准确可靠,其预测疲劳寿命的误差因子绝对值的平均值和标准差最小,分别为0.042和0.131,比改进Aeran模型分别小0.021和0.035,比Miner模型分别小0.011和0.099。

## 参考文献:

- [1] YANG B W, HUO J Z, GAO Q, et al. Research on factors affecting fretting fatigue life of high-temperature dovetail tenon[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2022, 45(4): 1126-1144.
- [2] 侯军, 王晓玮. 考虑载荷相互作用的高低周复合疲劳寿命预测模型[J]. 机械工程材料, 2023, 47(4): 83-87.  
HOU J, WANG X W. Prediction model of combined high and low cycle fatigue life considering load interaction[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2023, 47(4): 83-87.
- [3] ZHANG R, ZHANG Y M, ZHU L S, et al. Fatigue failure mechanism of coal mining machine cutting gearbox housing[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42(6): 273.
- [4] 李冬, 王小威, 陈野风, 等. 不同控制模式下316L不锈钢的高温疲劳变形行为及寿命预测[J]. 机械工程材料, 2024, 48(3): 102-111.  
LI D, WANG X W, CHEN Y F, et al. High temperature fatigue deformation behavior and life prediction of 316L stainless steel under different control modes[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2024, 48(3): 102-111.
- [5] BATSOULAS N D, GIANNOPOULOS G I. Cumulative fatigue damage of composite laminates: Engineering rule and life prediction aspect[J]. Materials, 2023, 16(8): 3271.
- [6] LIU P S, WANG X W, SHEN Q, et al. A nonlinear cumulative fatigue damage life prediction model under combined cycle fatigue loading considering load interaction[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 177: 107972.
- [7] 王妍, 毕俊喜, 葛新宇, 等. 航空发动机叶片高低周复合疲劳寿命预测与损伤机理研究[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 324-329.  
WANG Y, BI J X, GE X Y, et al. Aero-engine blade high and low circumference composite fatigue life

- prediction and damage mechanism research[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 42(4): 324-329.
- [8] AERAN A, SIRIWARDANE S C, MIKKELSEN O, et al. A new nonlinear fatigue damage model based only on  $S-N$  curve parameters[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 103: 327-341.
- [9] AERAN A, ACOSTA R, SIRIWARDANE S C, et al. A nonlinear fatigue damage model: Comparison with experimental damage evolution of S355 (SAE 1020) structural steel and application to offshore jacket structures[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 135: 105568.
- [10] 余奥迪. 航空发动机主轴承疲劳寿命预测及可靠性分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.  
YU A D. Fatigue life prediction and reliability analysis of aero-engine main shaft bearings[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [11] 刘源. 基于非线性累积损伤理论的机械结构疲劳寿命预测方法研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2023: 53-54.  
LIU Y. Research on fatigue life prediction method of mechanical structures based on nonlinear cumulative damage theory[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023: 53-54.
- [12] FANG C Z, TANG D Q, LI Z X, et al. A new fatigue equation for asphalt mixtures considering loading sequence effects[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e03286.
- [13] 范文亮, 李正良, 李明亮. 考虑加载次序影响的改进M-H模型[J]. 工程力学, 2025, 42(4): 179-186.  
FAN W L, LI Z L, LI M L. An improved M-H model considering loading sequence effect[J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(4): 179-186.
- [14] 黄洪钟, 刘忠贺, 孙占全, 等. 影响疲劳强度可靠性的模糊因素分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2002, 20(4): 12-14.  
HUANG H Z, LIU Z H, SUN Z Q, et al. Analysis of fuzzy factors that affect reliability of fatigue[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2002, 20(4): 12-14.
- [15] 方义庆, 胡明敏, 罗艳利. 基于全域损伤测试建立的连续疲劳损伤模型[J]. 机械强度, 2006, 28(4): 582-586.  
FANG Y Q, HU M M, LUO Y L. New continuous fatigue damage model based on whole damage field measurement[J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(4): 582-586.
- [16] 尚德广, 姚卫星. 单轴非线性连续疲劳损伤累积模型的研究[J]. 航空学报, 1998, 19(6): 8-17.  
SHANG D G, YAO W X. Study on nonlinear continuous damage cumulative model for uniaxial fatigue[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998, 19(6): 8-17.

## Fatigue Life Prediction by Modified Aeran Model Based on Loading History and Average Stress

WANG Liuying<sup>1</sup>, BI Junxi<sup>1,2</sup>, HOU Wei<sup>3</sup>, ZHANG Guobin<sup>4</sup>, SUN Pengwen<sup>2</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>

(1. School of Aeronautics, 2. School of Mechanics Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. School of Aircraft Engineering, Xi'an Aeronautical Institute, Xi'an 710077, China; 4. Huhhot Zhonghuan (Group) Co., Ltd., Huhhot 010051, China)

**Abstract:** Aiming at problems of fatigue damage and life prediction of structures under variable amplitude loads, based on the nonlinear cumulative damage theory, the Aeran model was modified by introducing a load interaction factor and a real-time load function related with stress levels. The Aeran nonlinear fatigue cumulative damage model considering loading histories (including load interaction and loading sequence) and average stresses was established and verified with fatigue test data of 30CrMnSiA steel, 45 steel and 16Mn steel under two-stage loading. The prediction results by the modified Aeran model were compared with those by the improved Aeran model only considering load interaction and Miner model. The results show that the normalized fatigue life predicted by the modified Aeran model and the normalized test results were concentrated near the  $x=y$  reference line, indicating the accuracy of the model. Among the three prediction models, the average value and standard deviation of absolute values of the error factor of the modified Aeran model were the smallest, which were 0.042 and 0.131, respectively. These values were 0.021 and 0.035 less than those of the improved Aeran model, and 0.011 and 0.099 less than those of the Miner model, respectively.

**Key words:** life prediction; Aeran model; nonlinear fatigue cumulative damage; loading history; average stress