

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2021.22

基于动态剩余 S-N 曲线的线性疲劳寿命预测模型

张拓, 刘坤¹, 何爱民², 孙义忠², 石万凯¹

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 南京高速齿轮制造有限公司, 南京 211100)

摘要:为估算结构在变幅载荷下的疲劳寿命,在动态剩余 S-N 曲线的基础上,结合材料的退化规律,对材料受载过程中的累积疲劳损伤进行了量化,提出了一种预测变幅载荷下线性疲劳损伤预测模型。根据热轧 16Mn 钢和 20Cr2Ni4A 标准圆柱齿轮多级载荷下疲劳寿命试验数据,对提出模型的疲劳寿命预测能力进行了验证。结果表明:基于强度退化的线性疲劳寿命预测模型相对传统 Miner 法则和材料记忆退化累积模型的预测结果更接近试验结果,具有较高的预测精度。

关键词:动态剩余 S-N 曲线;退化规律;寿命预测;弯曲疲劳试验

中图分类号:TH114

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2023)03-084-10

A linear fatigue life prediction model based on dynamic residual S-N curve

ZHANG Tuo¹, LIU Kun¹, HE Aiming², SUN Yizhong², SHI Wankai¹

(1.State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2.Nanjing High Speed Gear Manufacturing Co., Ltd., Nanjing 211100, P. R. China)

Abstract: In order to estimate the fatigue life of structures under variable amplitude loading, based on the dynamic residual S-N curve, the cumulative fatigue damage of materials under loading was quantified combined with the degradation law of materials, and a linear fatigue damage prediction model under variable amplitude loading was proposed. According to the fatigue life test data of hot-rolled 16Mn steel and 20Cr2Ni4A standard cylindrical gear under multistage load, the fatigue life prediction accuracy of the proposed model was verified. The results show that the prediction results of the linear fatigue life prediction model based on strength degradation is closer to the experimental results than those of the traditional Miner's rule and material memory degradation accumulation model, showing higher prediction accuracy.

Keywords: dynamic residual S-N curve; degradation rule; life prediction; bending fatigue test

疲劳破坏是机械结构部件和零件的主要失效形式,在实际工程中,这些部件通常要承受不同强度的周期性波动载荷,评估损伤程度具有巨大的难度和挑战性^[1-4]。而建立部件可靠的累积损伤模型,可以有效提高疲劳寿命的预测精度,且有助于提前更换损伤元件和指定合理的维护策略,具有重要的研究意义。

目前,国内外学者对疲劳寿命预测从多方面进行了研究,薛齐文等^[5]基于疲劳驱动力能量损伤参数,对

收稿日期:2021-05-12 网络出版日期:2021-06-08

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB2001605)。

Supported by National Key Research and Development Plan (2018YFB2001605).

作者简介:张拓(1994—),男,博士研究生,主要研究方向为齿轮传动,(E-mail)ttuo_zhang@163.com。

通信作者:石万凯,男,教授,博士生导师,(E-mail)wankai_shi@cqu.edu.cn。

相邻载荷间的交互因子进行修正,建立改进的非线性疲劳寿命预测模型,对焊接结构进行了疲劳寿命预测。Zhu 等^[6]提出了一种基于单轴疲劳数据的能量等效损伤参数,用于预测多轴疲劳载荷下的疲劳寿命,并利用试验对该模型及参数的有效性进行了验证。吴博伟等^[7]在现有的非线性疲劳损伤累积模型微动疲劳寿命预测模型的基础上分析航空发动机榫连接结构在不同温度下的微动疲劳寿命。但大多数研究均是基于非线性损伤理论,在处理复杂载荷谱时需要针对不同级别的载荷进行大量的等效折算,计算量较大,且估算过程比较复杂。S-N 曲线作为反映材料疲劳强度的特性曲线,可以表示外部加载应力水平与材料试样疲劳寿命之间的关系,近年来,用 S-N 曲线法建立疲劳损伤模型的报道相当集中^[8-9],并受到越来越多的关注。谢里阳等^[10]提出了剩余 S-N 曲线的表达形式,通过对原始曲线进行平移可以获得材料的剩余 S-N 曲线。彭兆春等^[11-12]在剩余 S-N 曲线的基础上提出了剩余 S-N 曲线的表达形式,对剩余 S-N 曲线进行旋转,根据材料在不同损伤度的剩余 S-N 曲线的关系,建立疲劳损伤累积模型。

笔者在动态剩余 S-N 曲线的基础上,结合材料的退化规律,利用动态剩余 S-N 曲线的特点,利用坡度比的变化评估材料的疲劳损伤状态,并结合材料的退化规律,对材料受载过程中的累积疲劳损伤进行了量化,提出了一种预测变幅载荷下线性疲劳损伤预测模型。为进一步对模型的有效性和可靠性进行验证,设计了三级载荷下的齿轮弯曲疲劳寿命循环寿命试验并结合文献提供的热轧 16Mn 钢二级载荷下疲劳寿命实测数据,与其他传统的寿命预测结果进行了对比,验证了模型的有效性。

1 动态剩余 S-N 曲线

对变幅载荷试验进行分析,首先材料在应力幅值为 σ_1 的载荷下循环加载 n_1 次,随后转入应力幅值为 σ_2 的载荷下循环加载,当加载到 n_2 次时,材料发生破坏,则该材料的 S-N 曲线、动态剩余 S-N 曲线和动态剩余 S-N 曲线可以按照图 1 的形式进行表示。

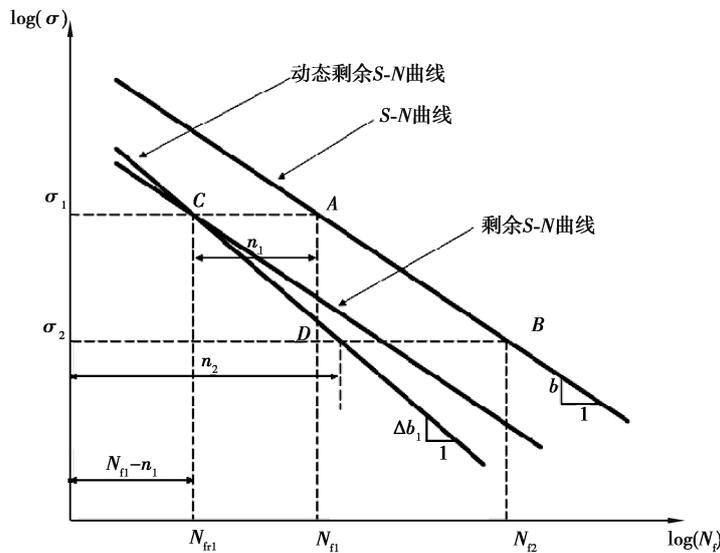


图 1 动态剩余 S-N 曲线形式

Fig.1 Dynamic residual S-N curve

S-N 曲线的幂函数形式^[13]可表示为

$$\sigma^m N_f = C, \tag{1}$$

式中: N_f 为在应力水平 σ 下发生失效时的加载循环次数; m 和 C 为材料常数。

对式(1)两边取对数得

$$\log(\sigma) = a + b \log(N_f). \tag{2}$$

可看出 S-N 曲线在双对数坐标系下是一个如图 1 所示的关于 $\log(\sigma)$ 和 $\log(N_f)$ 的直线方程,式中 a 为直线的截距($a = \log(C)/m$), b 为直线的斜率($b = -1/m$)。

谢里阳等^[10]通过试验研究发现:材料的剩余 S-N 曲线是原始 S-N 曲线经过平移作用结果,其剩余寿命与材料的损伤状态有关。当材料处于结构完好的状态时,其在应力幅 σ_1 下的剩余寿命为 N_{f1} ,即该材料的剩余寿命可利用 S-N 曲线进行表征。当材料存在初始损伤,且该初始损伤有应力幅 σ_1 下加载循环 n_1 次引起时,则该材料的剩余寿命曲线可用图 1 所示的剩余 S-N 曲线表示,其中其在应力幅 σ_1 下的剩余寿命为 $N_{f1} = N_f - n_1$,可表征为材料的剩余寿命与外部加载的关系,则剩余 S-N 曲线的数学表达形式可表示为

$$\log(\sigma) = a' + b \log(N_f) \quad (3)$$

式中 a' 为剩余 S-N 曲线对应截距。

而当材料发生损伤劣化时,其内部状态发生变化,实时 S-N 曲线应当发生改变,故在剩余 S-N 曲线的基础上可提出动态剩余 S-N 曲线的概念,即材料的剩余 S-N 曲线是原始 S-N 曲线经过平移和旋转叠加作用结果,其斜率应当为一个与载荷加载状态相关的变量,通过斜率的变化可动态表征构建累积损伤增长过程。如图 1 所示,动态剩余 S-N 曲线的数学表达形式可描述为

$$\log(\sigma) = a'' + \Delta b \log(N_f) \quad (4)$$

式中 a'' 和 Δb 分别为动态剩余 S-N 曲线对应截距和斜率。

当材料在初始状态时, $N_{f1} = N_f$, $\Delta b = b$, 曲线与 S-N 曲线重合;加载状态下,材料的剩余寿命逐渐减小,曲线斜率 Δb 逐渐增大;当材料在临界状态时,材料趋于破坏状态,曲线斜率 $\Delta b \rightarrow \infty$,通过斜率的变化,可以表征材料从初始状态向临界状态变化的过程,即可通过斜率的变化可定性的描述材料的状态变化过程。

通过定义斜率比 $b_r = b / \Delta b$ 描述材料的损伤过程,初始状态时, $b / \Delta b = 1$,材料无损伤破坏;加载过程中, $b / \Delta b \in (0, 1)$;当材料临界状态时, $b / \Delta b = 0$,材料趋于破坏,因此通过研究斜率比 b_r 的演化规律,可以建立材料的疲劳损伤累积模型。

2 材料退化规律分析

为定量分析动态剩余 S-N 曲线斜率的变化规律,需要对试件使用过程中的强度退化规律进行分析。周杰^[14]从心理学的角度提出了材料记忆的概念,赋予材料记忆和遗忘的功能,根据艾宾浩斯遗忘曲线,将时间函数替换为循环载荷,得到了材料记忆的函数

$$M = (A_m - B_m) e^{-\frac{n}{d_m}} + B_m \quad (5)$$

式中: M 为材料记忆性能; A_m 为记忆因子; B_m 为渐进线; d_m 为遗忘因子倒数,取 $d_m = N_f$ 。

根据材料退化的特点,在载荷作用的初期,循环载荷产生缺陷对结构强度影响较小,此次材料性能退化呈现较为缓慢的趋势,随着时间的推移,材料裂纹开始扩展,导致退化趋势随载荷的增加而加剧,当接近极限载荷 N_f 时刻时呈现“突然死亡”的特点^[15-16],其强度退化曲线如图 2 所示。

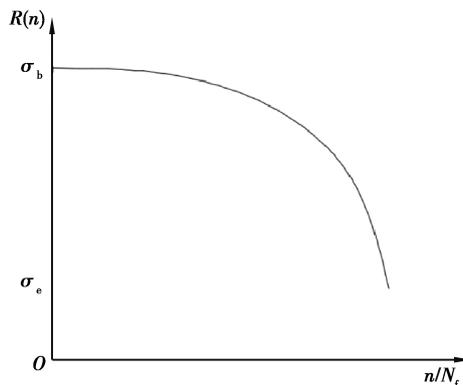


图 2 强度退化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of strength degradation

基于该特点,可以得出材料与载荷循环次数相关的强度退化函数为

$$R(n) = \left(\sigma_e + \frac{\sigma_b - \sigma_e}{e - 1} \right) + \frac{\sigma_e - \sigma_b}{1 + e} e^{\frac{n}{d_m}} \quad (6)$$

式中: $R(n)$ 为材料剩余强度; σ_b 为材料初始强度; σ_e 为材料在破坏时刻的剩余疲劳强度; d_m 为退化因子倒数, 这里取 $d_m = N_f$ 。

引入一个退化系数表征材料在加载过程的退化程度, 定义

$$\alpha = \frac{R(n) - R(N_f)}{R(0) - R(N_f)} = \frac{e - e^{\frac{n}{N_f}}}{e - 1} \quad (7)$$

式中 α 为一个与载荷循环比相关的材料退化系数, 范围为 $[0, 1]$ 。

初始时刻时 $n=0, R(0) = \sigma_b, \alpha = 1$; 材料无损伤破坏; 加载过程中 $n \in (0, N_f)$, 材料开始损伤, 剩余强度逐渐降低, α 减少, $\alpha \in (0, 1)$; 当材料临界状态时, $n = N_f, \alpha = 0$, 材料趋于破坏, 可以退化系数 α 表征材料从初始状态向临界失效状态转换的过程。

3 线性疲劳损伤预测模型

3.1 二级载荷加载预测模型

为研究材料疲劳损伤预测模型, 对两级循环加载的过程进行分析, 材料首先下一级应力 σ_1 下加载 n_1 次, 然后循环加载转入二级应力 σ_2 , 此时损伤曲线转换为动态 S-N 曲线, 加载 n_2 次时材料发生破坏, 不同加载次序下动态剩余 S-N 曲线的变化规律如图 3 所示。利用材料退化系数 α 对动态剩余 S-N 曲线斜率比的演化规律进行量化, 建立疲劳损伤预测模型。

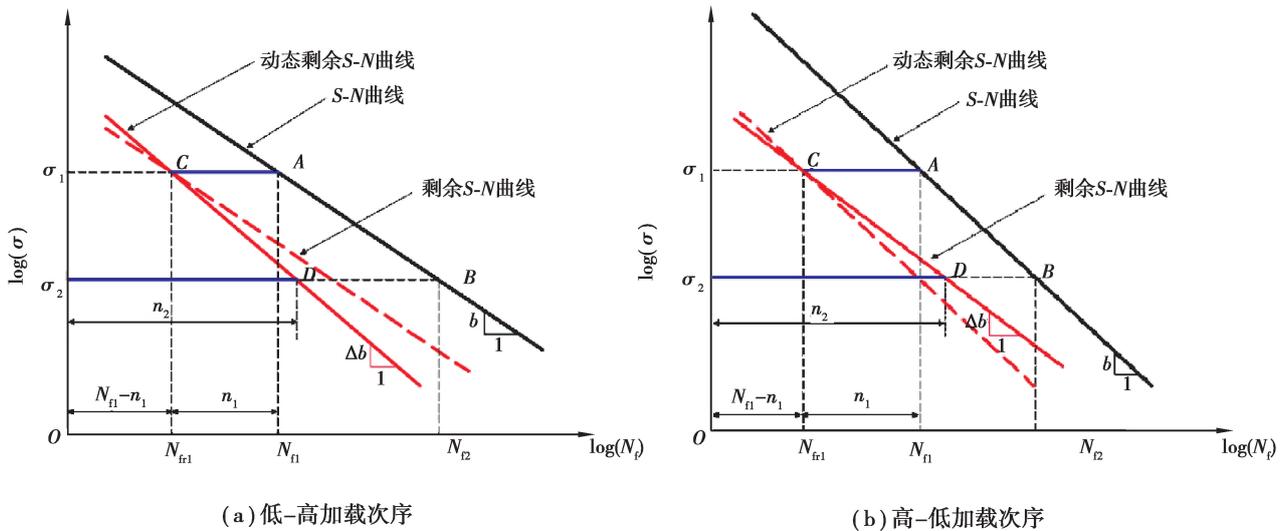


图 3 二级循环加载变化规律
Fig. 3 Variation law of secondary cyclic loading

对图 3 中 S-N 曲线进行分析, 点 $A(N_{f1}, \sigma_1), B(N_{f2}, \sigma_2)$ 应满足剩余式 2, 即:

$$\begin{aligned} \log(\sigma_1) &= a + b \log(N_{f1}), \\ \log(\sigma_2) &= a + b \log(N_{f2}). \end{aligned} \quad (8)$$

整理可得

$$\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right) = b \log\left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right) \quad (9)$$

同理, 对图中剩余 S-N 曲线进行分析, 点 $C(N_{f1}, \sigma_1), B(n_{p2}, \sigma_2)$ 应满足剩余式(4), 即:

$$\begin{aligned} \log(\sigma_1) &= a''_1 + \Delta b \log(N_{f1} - n_1), \\ \log(\sigma_2) &= a''_1 + \Delta b \log(n_{p2}), \end{aligned} \quad (10)$$

整理可得

$$\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right) = \Delta b \log\left(\frac{N_{f1} - n_1}{n_{p2}}\right) \tag{11}$$

式中： n_{p2} 为模型预测剩余寿命，利用材料退化系数 α 对动态剩余 S-N 曲线斜率比的演化规律进行量化，受到二级载荷时，动态剩余 S-N 曲线变化的斜率比可描述为

$$b_{r1} = \frac{b}{\Delta b_1} = \alpha_1 = \frac{e - e^{\frac{n_1}{N_{f1}}}}{e - 1} \tag{12}$$

联立式(9)(11)(12)可得

$$\frac{n_{p2}}{N_{f2}} = \left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right) \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right) 1 - \alpha_1 = \left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right) \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right) 1 - \frac{e - e^{\frac{n_1}{N_{f1}}}}{e - 1} \tag{13}$$

当采用先高后低的加载次序时， $N_{f1} < N_{f2}$ ，根据式(13)可得

$$\frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} = \frac{n_1}{N_{f1}} + \left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right) \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right) 1 - \alpha < 1 \tag{14}$$

高应力下使裂纹形成，低应力使裂纹扩展。同理，当采用先低后高的加载次序时， $N_{f1} > N_{f2}$ ，可得

$$\frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} = \frac{n_1}{N_{f1}} + \left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right) \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right) 1 - \alpha > 1 \tag{15}$$

裂纹形成时间发生了推迟，与大多数疲劳损伤试验结果相吻合，说明该预测模型符合载荷加载时序对材料疲劳寿命影响的规律。

3.2 多级载荷加载预测模型

将二级载荷预测模型向多级载荷进行推导，在三级载荷作用下，不同加载次序下动态剩余 S-N 曲线演化规律如图 4 所示。

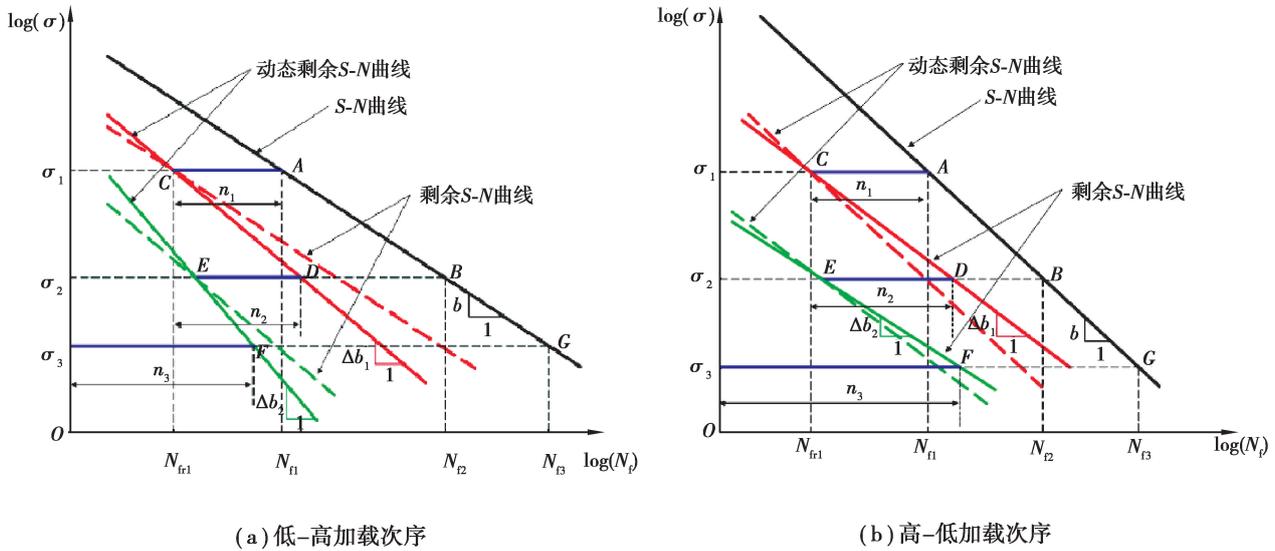


图 4 三级循环加载变化规律
Fig. 4 Variation law of tertiary cyclic loading

同理，点 $B(N_{f2}, \sigma_2)$ ， $G(N_{f3}, \sigma_3)$ 应满足剩余式(2)，即

$$\begin{aligned} \log(\sigma_2) &= a + b \log(N_{f2}), \\ \log(\sigma_3) &= a + b \log(N_{f3}), \end{aligned} \tag{16}$$

整理可得

$$\log\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_3}\right) = b \log\left(\frac{N_{f2}}{N_{f3}}\right) \tag{17}$$

根据式(13)，点 D 的坐标点为 (n_{p2}, σ_2) ，则点 E 和 F 可表示为 $(n_{p2} - n_2, \sigma_2)$ 和 (n_{p3}, σ_3) 。根据式(4)，

可得

$$\begin{aligned} \log(\sigma_2) &= a''_2 + \Delta b_2 \log(n_{p2} - n_2), \\ \log(\sigma_3) &= a''_2 + \Delta b_2 \log(n_3), \end{aligned} \tag{18}$$

整理可得

$$\log\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_3}\right) = \Delta b_2 \log\left(\frac{n_{p2} - n_2}{n_3}\right). \tag{19}$$

受到三级载荷时,动态剩余 S-N 曲线变化的斜率比可描述为

$$b_{r2} = \frac{b}{\Delta b_2} = \alpha_2 = \frac{e - e^{\frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}}}}{e - 1}. \tag{20}$$

联立式(9)(11)(12)可得

$$\frac{n_{p3}}{N_{f3}} = \left(\frac{n_{p2}}{N_{f2}} - \frac{n_3}{N_{f2}}\right) \left(\frac{N_{f2}}{N_{f3}}\right) 1 - \alpha_2, \tag{21}$$

同理,根据式(20)(21)可将疲劳损伤预测模型推广至多级载荷加载,即

$$\alpha_{n-1} = \frac{e - e^{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{n_i}{N_{fi}}}}{e - 1}, \tag{22}$$

$$\frac{n_{pn}}{N_{fn}} = \left(\frac{n_{p(n-1)}}{N_{f(n-1)}} - \frac{n_n}{N_{f(n-1)}}\right) \left(\frac{N_{f(n-1)}}{N_{fn}}\right) 1 - \alpha_{(n-1)}. \tag{22}$$

3.3 模型验证分析

为验证提出的线性疲劳损伤预测模型的有效性,根据文献[17]提供的热轧 16Mn 钢二级载荷下疲劳寿命实测数据,对本文的预测模型、文献[11]提出的材料记忆退化累积模型以及传统 Miner 法则的寿命预测结果进行了对比分析。

根据文献,当单独热轧 16Mn 钢施加大小为 394 MPa 和 345 MPa 的载荷时,其疲劳寿命分别为 9.35×10^4 和 4.022×10^5 次,二级载荷疲劳试验结果如表 1 所示。

表 1 二级载荷疲劳寿命结果

Table 1 The fatigue life results under secondary load

模式	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	n_1 /次	n_2 /次
1	394	345	9 350	269 500
2	394	345	19 700	236 100
3	394	345	39 400	209 500
4	394	345	46 750	159 300
5	394	345	56 100	74 000
6	345	394	181 000	82 867
7	345	394	197 100	80 970
8	345	394	233 300	59 570

结合表 1 试验数据,根据式(13),可以预测出材料在二级载荷下的疲劳寿命,不同预测模型对应的二级载荷疲劳寿命预测结果如表 2 和图 5 所示。

表 2 模型寿命预测结果

Table 2 Life prediction results by models

模式	n_2/N_{f2}			
	试验	文章模型	记忆退化	Miner 法则
1	0.670 1	0.823 1	0.722 5	0.900 0
2	0.587 0	0.646 8	0.509 1	0.789 3
3	0.520 9	0.370 8	0.261 6	0.578 6
4	0.396 1	0.288 2	0.201 6	0.500 0
5	0.184 0	0.199 0	0.141 2	0.400 0
6	0.886 3	0.891 1	1.269 3	0.550 0
7	0.866 0	0.872 4	1.247 0	0.509 9
8	0.637 1	0.818 6	1.159 8	0.419 9

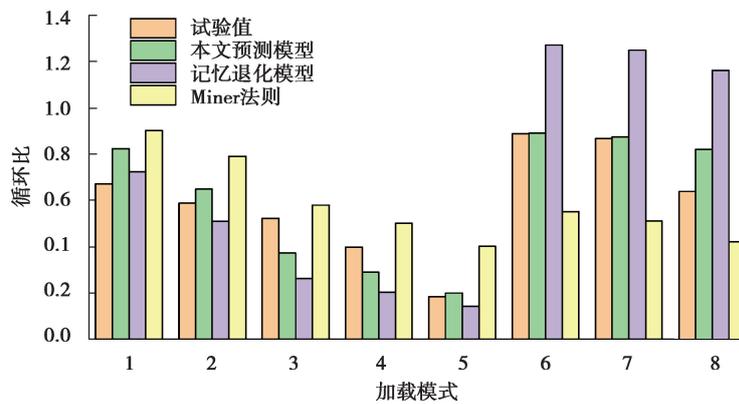


图 5 模型寿命预测结果对比

Fig. 5 Comparison of life prediction results by models

4 试验验证

设计了三级载荷下的齿轮弯曲疲劳寿命循环寿命试验,对提出的寿命预测模型在多级加载工况下的预测精度进行了进一步验证。

4.1 疲劳试验方法

在常温条件下,利用高频拉压疲劳试验机对齿轮进行弯曲疲劳加载试验,试验机的结构和齿轮的加载方式分别如图 6 和图 7 所示,主要性能参数为:加载频率 50~150 Hz,最大平均载荷 150 kN,最大交变载荷 150 kN。

试验对象选择标准圆柱直齿轮,材料 20Cr2Ni4A,表面磨削,渗碳淬火层深 0.8 mm,表面硬度 60HRC,齿轮模数为 4,齿数 23,压力角 20°。按照《GB/T 14230—1993 齿轮弯曲疲劳强度试验方法》,利用升降法和成组法拟合出试验齿轮疲劳特性曲线,可以得出试验齿轮在分别单独施加大小为 477.418,516.711,582.396 MPa 载荷时,其疲劳寿命分别为 4.065×10^5 , 3.041×10^5 , 1.339×10^5 次。



图 6 加载试验机结构
Fig. 6 Structure of loading test machine



图 7 齿轮加载方式
Fig. 7 Gear loading method

4.2 试验结果

对齿轮进行多级加载,在应力级别 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为 477.418, 516.711, 582.396 MPa 的 3 个应力水平下连续加载直至齿轮发生失效,根据加载顺序设计了 3 种加载模式,各模式下应力加载顺序和试验结果如表 3 所示。

表 3 变幅加载下齿轮弯曲疲劳试验结果

Table 3 Results of gear bending fatigue tests under variable amplitude loading

加载模式	加载顺序	加载应力	加载循环次数/次			均值
			n_1	n_2	n_3	
模式 1	低-高加载	$\sigma_1 \rightarrow \sigma_2 \rightarrow \sigma_3$	50 000	60 000	106 289	94 151
					92 429	
					105 989	
					126 172	
					39 876	
模式 2	高-低加载	$\sigma_3 \rightarrow \sigma_2 \rightarrow \sigma_1$	30 000	40 000	362 797	220 143
					325 013	
					152 190	
					170 572	
					90 143	
模式 3	随机加载	$\sigma_2 \rightarrow \sigma_1 \rightarrow \sigma_3$	90 000	100 000	70 131	57 319
					40 273	
					71 851	
					44 970	
					59 370	

4.3 试验数据分析

结合表 3 试验数据,根据式(13),对齿轮在三级循环载荷下疲劳寿命进行预测,并与记忆退化模型和 Miner 法则预测结果进行对比,其寿命预测结果如表 4 和图 8 所示。

表 4 三级加载寿命预测

Table 4 Three-level loading life prediction

模式	n_2/N_{t2}			
	试验	文章模型	记忆退化	Miner 法则
1	0.703 1	0.712 5	0.670 7	0.712 6
2	0.541 6	0.536 3	0.382 7	0.639 9
3	0.428 1	0.419 0	0.395 2	0.482 6

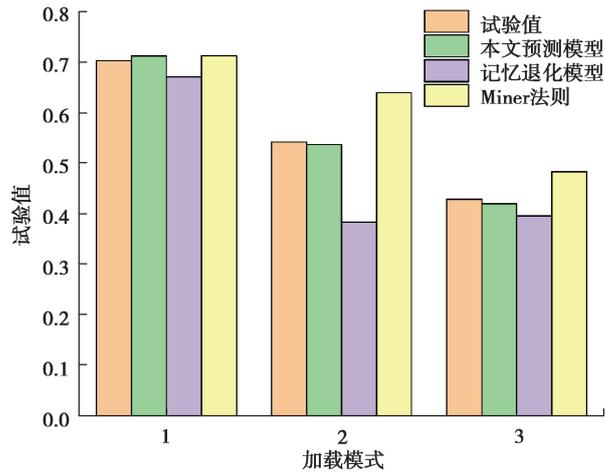


图 8 三级加载寿命预测对比

Fig. 8 Comparison of three-level loading life prediction

根据表 4 和图 7 显示的结果,在低-高加载模式下,3 种预测模型与试验结果比较接近,在高-低加载模式和随机加载模式下,提出的基于强度退化的线性疲劳寿命预测模型相对传统 Miner 法则和材料记忆退化累积模型的预测结果更接近试验结果,具有更高的预测精度,进一步验证了提出的模型具有较高的正确性和较好的适用性。

5 结 论

1) 在动态剩余 $S-N$ 曲线的基础上,结合材料的退化规律,利用动态剩余 $S-N$ 曲线的特点和坡度比的变化评估材料的疲劳损伤状态,并结合材料的退化规律,对材料受载过程中的累积疲劳损伤进行了量化,提出了一种预测变幅载荷下线性疲劳损伤预测模型。

2) 结合热轧 16Mn 钢二级载荷下疲劳寿命实测数据,将预测结果与传统 Miner 法则和材料记忆退化累积模型进行对比,提出的模型具有较高的预测精度。

3) 根据齿轮弯曲疲劳寿命循环寿命试验结果,笔者提出的基于强度退化的线性疲劳寿命预测模型相对传统 Miner 法则和材料记忆退化累积模型的预测结果更接近试验结果,进一步证明了该模型具有更高的预测精度。

4) 基于强度退化的线性疲劳寿命预测模型保留了 Miner 法则形式上的简易性,可用于预测机械部件的高周疲劳寿命。该模型考虑了载荷历程中所有载荷的寿命水平以及此前载荷的损伤状态,使寿命预测精度得到显著提升,可有效地对多级载荷情况下机械部件的寿命进行定量分析,且物理意义更加明确。

5) 笔者主要研究单轴应力下机械构件的疲劳寿命预测,如需分析构件在多轴应力状态下的疲劳寿命,需要将多轴载荷状态下的应力应变等效为单轴载荷下的应力应变后进行寿命预测分析。

参考文献:

- [1] 谢里阳,任俊刚,吴宁祥,等.复杂结构部件概率疲劳寿命预测方法与模型[J].航空学报,2015,36(8):2688-2695.
Xie L Y, Ren J G, Wu N X, et al. Probabilistic fatigue life prediction method and modeling for complex structural parts[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(8): 2688-2695. (in Chinese)
- [2] Santecchia E, Hamouda A M S, Musharavati F, et al. A review on fatigue life prediction methods for metals[J/OL]. Advances in Materials Science and Engineering, 2016, 2016[2021-05-06]. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/9573524>.
- [3] 刘俭辉,王生楠,黄新春,等.基于损伤力学-临界面法预估多轴疲劳寿命[J].机械工程学报,2015,51(20):120-127.
Liu J H, Wang S N, Huang X C, et al. Multiaxial fatigue life prediction based on damage mechanics and critical plane method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(20): 120-127. (in Chinese)
- [4] Bartelmus W. Object and operation supported maintenance for mining equipment[J]. Mining Science, 2014, 21:7-21.
- [5] 薛齐文,许旭,王生武.基于疲劳驱动力能量损伤参数修正的非线性疲劳寿命预测[J].中国铁道科学,2020,41(2):99-105.
Xue Q W, Xu X, Wang S W. Nonlinear fatigue life prediction based on energy damage parameter correction of fatigue driving force[J]. China Railway Science, 2020, 41(2):99-105. (in Chinese)
- [6] Zhu H P, Wu H, Lu Y Y, et al. A novel energy-based equivalent damage parameter for multiaxial fatigue life prediction[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 121: 1-8.
- [7] 吴博伟,张宏建,崔海涛,等.基于连续介质损伤力学的高温微动疲劳寿命预测模型[J].航空动力学报,2019,34(3):656-663.
Wu B W, Zhang H J, Cui H T, et al. High-temperature fretting fatigue life prediction model based on continuum damage mechanics[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(3): 656-663. (in Chinese)
- [8] Peng Z C, Huang H Z, Wang H K, et al. A new approach to the investigation of load interaction effects and its application in residual fatigue life prediction[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2016, 25(5): 672-690.
- [9] Pavlou D G. The theory of the S-N fatigue damage envelope: Generalization of linear, double-linear, and non-linear fatigue damage models[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 110: 204-214.
- [10] 谢里阳,徐灏.一个新的连续损伤累积模型[J].机械工程学报,1991,27(1):52-57.
Xie L Y, Xu H. A new continuous accumulative damage model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 1991, 27(1): 52-57. (in Chinese)
- [11] 彭兆春.基于疲劳损伤累积理论的结构寿命预测与时变可靠性分析方法研究[D].成都:电子科技大学,2017.
Peng Z C. Research on methods for structural life prediction and time-dependent reliability analysis using engineering cumulative fatigue damage theories [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
- [12] Peng Z C, Huang H Z, Zhou J, et al. A new cumulative fatigue damage rule based on dynamic residual S-N curve and material memory concept [J]. Metals, 2018, 8:1-17.
- [13] 李舜酩.机械疲劳与可靠性设计[M].北京:科学出版社,2006:22-45.
Li S M. Mechanical fatigue and reliability design[M]. Beijing: Science Press, 2006:22-45. (in Chinese)
- [14] 周杰.航空发动机涡轮叶片疲劳寿命及可靠性分析[D].电子科技大学,2019.
Zhou J. Fatigue life prediction and reliability analysis of aero-engine turbine blades[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [15] 张禄,纪威,周炜,等.基于强度退化的疲劳累积损伤模型[J].农业工程学报,2015,31(S1), 31: 47-52.
Zhang L, Ji W, Zhou W, et al. Fatigue cumulative damage models based on strength degradation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(S1), 31: 47-52. (in Chinese)
- [16] 李威.基于强度退化累积损伤模型的承载结构疲劳寿命预测研究[D].北京:北京交通大学,2019.
Li W. Fatigue life prediction research of load bearing structure based on cumulative damage model considering strength degradation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [17] 高会英.复杂应力状态下焊接接头的疲劳寿命预测方法研究[D].成都:电子科技大学,2016.
Gao H Y. Research on fatigue life prediction methods of welded joints under complex stress states [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)