

# 考虑材料动态记忆特性的疲劳累积损伤模型

周思柱 向琼焱 曾云\*

长江大学机械工程学院,荆州,434020

**摘要:**为了评估工程构件在变幅载荷下的疲劳寿命,提高疲劳寿命的预测精度,以应力-寿命曲线(S-N曲线)为基础,考虑工程结构件承受循环载荷导致材料内部晶界开裂、滑移挤入、挤出引起的损伤和不可逆退化,引入了一种新形式的材料记忆性能函数,建立了一种新型疲劳累积损伤模型。采用30NiCrMoV12和30CrMnSiA两种材料的泵头体进行两级加载试验,以验证所提模型对疲劳寿命预测的准确性。结果表明:考虑材料动态记忆特性的疲劳累积损伤模型与其他模型相比,在高-低两级加载工况下的疲劳寿命预测结果在1.5倍的误差带内,预测误差均值小于0.1,具有较高的预测精度。

**关键词:**材料记忆性能;疲劳寿命预测;疲劳累积损伤;应力-寿命曲线

**中图分类号:**TH114

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.08.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Fatigue Cumulative Damage Model Considering Dynamic Memory Properties of Materials

ZHOU Sizhu XIANG Qiongyao ZENG Yun\*

School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei, 434020

**Abstract:** In order to evaluate the fatigue life of engineering components under variable amplitude loads and improve the prediction accuracy of fatigue life, based on the S-N curve, a new form of material memory performance function was introduced and a new fatigue cumulative damage model was established considering the damages and irreversible degradation caused by grain boundary cracking, slip extrusion and extrusion in the materials caused by cyclic loads. A two-stage loading tests were carried out on the pump head bodies of 30NiCrMoV12 and 30CrMnSiA to verify the accuracy of the model proposed herein for fatigue life prediction. The results show that the fatigue cumulative damage model considering the dynamic memory characteristics of the materials is compared with other models. The fatigue life prediction results under high-low two-stage loading conditions are within the error band of 1.5 times, and the mean prediction error is less than 0.1, which has higher prediction accuracy.

**Key words:** material memory property; fatigue life prediction; fatigue cumulative damage; S-N curve

### 0 引言

工程结构中,涡轮叶片、泵头体等部件承受着不同形式的变幅循环载荷,随着循环次数的增加最后直至断裂失效。为了最大限度地利用这类成本昂贵的工业部件,其剩余寿命的可靠性评估及实时监测就显得至关重要。因此,需要对部件的疲劳累积损伤程度进行量化处理,并作为损伤参量进行结构的剩余强度评估或监测,建立合适的疲劳累积损伤模型。

目前,疲劳累积损伤的进行定量表征一直是公认的难题,众多国内外学者已从宏微观层面对疲劳累积损伤进行了大量的研究。在微观层次上<sup>[1-4]</sup>,尽管疲劳破坏机理分析在微观力学上已取

得很大进展,但是循环载荷下疲劳损伤从微观角度进行定量建模和预测依旧较为复杂,而且涉及材料微观参数的疲劳累积损伤模型在工业领域的适用性也并不高。为此,学者对疲劳累积损伤的定量描述多是从宏观唯象角度<sup>[5-7]</sup>出发,其中,Miner建立的线性疲劳累积损伤模型<sup>[8]</sup>因计算简单而被广泛应用。但是,工程结构件在服役期间,由于本身存在工作环境、制造加工缺陷、承载复杂等因素的作用,导致Miner法则在部分领域的疲劳损伤评估上还存在一定的偏差。疲劳累积损伤是材料性能逐渐退化的一个过程,仅考虑累积损伤是单次损伤的线性相加是不够充分的,尤其是在多级变幅载荷的情况下,加载顺序、相互作用就更加难以忽略,若过于考虑影响因素造成计算复杂也不可取。Corten模型<sup>[9]</sup>和K-wofie模型<sup>[10]</sup>考虑了小载荷和载荷效应历程对损伤的影响,但是

收稿日期:2024-03-15

基金项目:国家自然科学基金(52174018)

没有充分描述多级加载作用下损伤的发展。ZHU等<sup>[11]</sup>引入了等损伤线的概念,提出了一种基于等损伤曲线的非线性累积疲劳损伤模型,可用于变幅载荷作用下工程构件的疲劳损伤建模和寿命评估,具有较高精度。高凯等<sup>[12]</sup>通过对数应力平方比的幂函数来考虑多级荷载的顺序和相互作用效应,建立了非线性疲劳累积损伤模型,试验结果表明新模型能进行时变可靠性分析。SUBRAMANYAN<sup>[13]</sup>提出了一种直接用于结构设计的疲劳累积损伤模型,该模型假设等损伤线会在应力-寿命(S-N)曲线的拐点处收敛,预测精度有一定提升,但该模型忽略了疲劳极限以下的小载荷作用,针对超高周疲劳工程结构的损伤评估有很大风险。S-N曲线作为评估寿命的一切基点,已有学者<sup>[14]</sup>将其作为参考量引入疲劳累积损伤模型。

上述研究中,一方面,考虑晶粒系数、晶界、晶胞参数等对试验成本和计算成本要求过高;另一方面,宏观定量描述的损伤参量计算成本较低,但缺乏一定的物理意义。无论是从微观角度或宏观角度建立疲劳累积损伤模型,均难以将材料参量考虑和计算方法简单两者兼顾<sup>[15]</sup>。本文基于材料的S-N曲线,考虑工程结构件承受循环载荷导致材料内部晶界开裂、滑移、挤出引起的损伤和不可逆退化,引入材料记忆性能函数,建立一种新型疲劳累积损伤模型,设计了泵头体材料两级加载试验并结合文献提供的30NiCrMoV12<sup>[16]</sup>和30CrMnSiA<sup>[17]</sup>试验数据,最后与Miner法则、Corten-Dolan法则和Kwofie-Rahbar法则进行了对比,以验证所提新模型的有效性。

## 1 动态剩余S-N曲线与材料记忆退化行为分析

### 1.1 动态剩余S-N曲线

在恒幅加载的情况下,材料的S-N曲线按照《GB/T 3075—2008》可以按下式直接测试得到(试验测试中每一次循环载荷下的疲劳损伤参量是等值的):

$$\log(\sigma_i) = a + b \log(N_{fi}) \quad (1)$$

式中: $a$ 为双对数坐标系下的截距; $b$ 为斜率; $\sigma_i$ 为应力; $N_{fi}$ 为疲劳寿命, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

工程设备在实际工况下承受多种变幅载荷,因此,在不同的载荷变化、加载频率、温度和湿度等因素的影响下,材料所承受的损伤程度各不相同,且材料性能也在不断变化。如图1所示,材料的S-N曲线“ABC”由式(1)表达,在 $\sigma_1$ 载荷下的疲劳寿命是 $N_{f1}$ 。经过 $n_1$ 次循环加载,剩余寿命

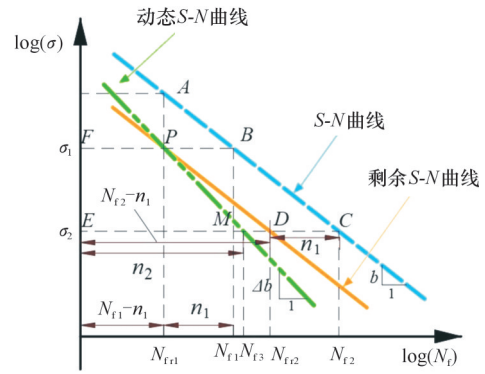


图1 双对数坐标下的三种曲线

Fig.1 Three kinds of curves in double logarithmic coordinates

$N_{f1} = N_{f1} - n_1$ ,材料剩余的S-N曲线就是“PD”,由下式表达:

$$\log(\sigma) = a' + b \log(N_{f1}) \quad (2)$$

式中, $N_{f1}$ 为应力水平 $\sigma_i$ 所对应的剩余寿命; $a'$ 为剩余S-N曲线“PD”截距。

由图1可知,经过第一级 $\sigma_1$ 载荷下 $n_1$ 次循环加载后,若再次加载的载荷变化为 $\sigma_2$ ,结合材料的剩余S-N曲线(“CD=PB”),剩余寿命应该为 $N_{f2} = N_{f2} - n_1$ 。

由于在实际工程中,构件的材料性能不是均匀变化的,需考虑材料强度的衰减退化<sup>[15]</sup>及动态剩余S-N曲线<sup>[18-19]</sup>,故有必要建立一种新的疲劳寿命预测模型。如图1所示,在经历第一级载荷 $\sigma_1$ 下的 $n_1$ 次循环加载后,剩余寿命应为 $N_{f1} = N_{f1} - n_1$ ,但在实际情况中由于其他外部因素的影响,材料性能会发生衰减退化,其寿命往往会比剩余S-N曲线所预测的寿命短,所以剩余S-N曲线会发生向下的偏折,由图1中的“PD”变为“PM”,即图1中的动态S-N曲线,若再次加载的载荷变化为 $\sigma_2$ ,在此载荷下,材料的剩余寿命也会由 $N_{f2}$ 变为 $N_{f3}$ 。该曲线可由下式表示:

$$\log(\sigma) = a'' + \Delta b \log(N_{f1}) \quad (3)$$

式中: $a''$ 为动态剩余S-N曲线的截距; $\Delta b$ 为动态剩余S-N曲线的斜率。

### 1.2 材料记忆性能

为定量分析材料在使用过程中的退化规律,根据艾宾浩斯遗忘曲线: $m_i = (a_m - c_m)e^{-b_m t} + c_m$ 建立新的模型,将时间 $t$ 替换为循环次数 $N$ ,用累积损伤 $1/d_m$ 替换维持量 $b_m$ ,得到关于材料记忆性能的函数<sup>[20-21]</sup>:

$$m_i = (a_m - c_m)e^{-N/d_m} + c_m \quad (4)$$

其中, $N$ 代表循环次数; $a_m$ 表示记忆速率; $c_m$ 代表渐近线; $d_m$ 是遗忘速率的倒数,并用循环次数来表示,取值可以是 $d_m = N_i$ 。于是,在一定数量的

循环周期后,累积的损伤可以被定义为

$$D' = \sum_{i=1}^n m_i \frac{1}{N_{fi}} \quad (5)$$

其中,  $i$  为给出的负载周期次数;  $N_{fi}$  是每一个应力级别对应的具体周期次数;  $N_f = \sum_{i=1}^n n_i$  是经过多级载荷直至疲劳失效的总循环数;  $m_i$  为遗忘系数。为了更好地表征材料的退化性能,引入衰退系数  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{M|_n - M|_{n=N_i}}{M|_{n=D} - M|_{n=N_i}} = \frac{[(a_m - c_m)e^{-\eta N_i} + c_m] - [(a_m - c_m)e^{-1} + c_m]}{a_m - [(a_m - c_m)e^{-1} + c_m]} = \frac{e^{-\eta N_i} - e^{-1}}{1 - e^{-1}} \quad (6)$$

其中,  $0 \leq \alpha \leq 1$ , 当  $\alpha = 0$  时, 构件发生断裂。

## 2 改进的疲劳累积损伤模型

### 2.1 改进的疲劳损伤模型新形式

很多学者将艾宾浩斯遗忘曲线的指数函数形式引入疲劳累积损伤模型<sup>[18]</sup>, 而部分学者指出用幂函数表示遗忘曲线可能更准确<sup>[22]</sup>。因此, 本文引入遗忘曲线的幂函数表示形式:

$$m_i = (a_m - c_m) N^{-1/d_m} + c_m \quad (7)$$

基于幂函数记忆退化函数模型定义新的衰退系数  $\alpha^*$ :

$$\alpha^* = \frac{[(a_m - c_m)n^{-1/N_i} + c_m] - [(a_m - c_m)(N_i)^{-1/N_i} + c_m]}{c_m - [(a_m - c_m)(N_i)^{-1/N_i} + c_m]} = \frac{n^{-1/N_i} - (N_i)^{-1/N_i}}{-(N_i)^{-1/N_i}} \quad (8)$$

两条直线的斜率比可以更好地反映材料损伤的演化规律, 所以引入斜率比:

$$b_r = \frac{b}{\Delta b} = \frac{n^{-1/N_i} - (N_i)^{-1/N_i}}{-(N_i)^{-1/N_i}} \quad (9)$$

由图1可知, 受到应力  $\sigma_2$  后, 材料的剩余寿命为  $N_{f2}$ , 而斜率由  $b$  转变为  $\Delta b$ , 因此斜率比变为

$$b_{r1} = \frac{b}{\Delta b_1} = \alpha_1^* = \frac{n_1^{-1/N_{f1}} - N_{f1}^{-1/N_{f1}}}{-N_{f1}^{-1/N_{f1}}} \quad (10)$$

结合图1, 可知  $B(N_{f1}, \sigma_1)$  点和  $C(N_{f2}, \sigma_2)$  点满足原始  $S-N$  曲线方程:

$$\log(\sigma_1) = a + b \log(N_{f1}) \quad (11)$$

$$\log(\sigma_2) = a + \Delta b \log(N_{f2}) \quad (12)$$

联立式(11)和式(12)可以解得

$$\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right) = b \log\left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right) \quad (13)$$

结合图1, 可知  $P(N_{f1}, \sigma_1)$  点和  $M(N_{f3}, \sigma_2)$  点满足剩余动态  $S-N$  曲线方程<sup>[18]</sup>:

$$\log(\sigma_1) = a'' + \Delta b_1 \log(N_{f1} - n_1) \quad (14)$$

$$\log(\sigma_2) = a'' + \Delta b_1 \log(n_2) \quad (15)$$

联立式(14)和式(15)可以解得

$$\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right) = \Delta b_1 \log\left(\frac{N_{f1} - n_1}{n_2}\right) \quad (16)$$

联立(13)和式(16)可以解得

$$\frac{b}{\Delta b_1} \log\left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right) = \log\left(\frac{N_{f1} - n_1}{n_2}\right) = \log\left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \frac{1 - \frac{n_1}{N_{f1}}}{\frac{n_2}{N_{f2}}}\right) \quad (17)$$

联立(10)和式(17)可以解得

$$\frac{n_2}{N_{f2}} = \left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right) \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right)^{1-\alpha_1} = \left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right) \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right)^{\left(\frac{n_1}{N_{f1}}\right)^{-\eta n_1}} \quad (18)$$

对式(18)进行等量转换, 可得

$$\frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right)^{\alpha_1-1} = 1 \quad (19)$$

分析式(18), 在高-低和低-高两种加载情况下, 其累计循环比分别为  $\frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right)^{\alpha_1-1} < 1$  和  $\frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right)^{\alpha_1-1} > 1$ 。

结合式(10)、式(13)、式(16)~(19)可以推算出在三级加载条件下,  $S-N$  曲线的斜率比和剩余寿命比分别为

$$b_{r2} = \frac{b}{\Delta b_2} = \frac{b}{\Delta b_1} \frac{\Delta b_1}{\Delta b_2} = \alpha_1^* \alpha_2^* = \frac{n_1^{-1/N_{f1}} - (N_{f1})^{-1/N_{f1}}}{-(N_{f1})^{-1/N_{f1}}} \frac{n_2^{-1/N_{f2}} - (N_{f2})^{-1/N_{f2}}}{-(N_{f2})^{-1/N_{f2}}} \quad (20)$$

$$\frac{n_3}{N_{f3}} = \left(1 - \frac{n_1}{N_{f1}}\right) \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right)^{1-\alpha_1} - \frac{n_2}{N_{f2}} \left(\frac{N_{f2}}{N_{f3}}\right)^{1-\alpha_2} \quad (21)$$

基于线性累计损伤法则, 假设临界损伤为  $D_c = 1$ , 三级加载条件下的累积损伤失效准则为

$$\frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right)^{\alpha_1-1} + \frac{n_3}{N_{f3}} \left(\frac{N_{f2}}{N_{f3}}\right)^{\alpha_2 \alpha_1-1} \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right)^{\alpha_1-1} = 1 \quad (22)$$

推广到多级加载的情况下,  $S-N$  曲线的斜率比和累积损伤失效准则分别为

$$b_{r(i-1)} = \frac{b}{\Delta b_{i-1}} = \frac{b}{\Delta b_1} \frac{\Delta b_1}{\Delta b_2} \dots \frac{\Delta b_{i-2}}{\Delta b_{i-1}} = \alpha_1^* \alpha_2^* \dots \alpha_{i-1}^* = \prod_{j=1}^{i-1} \frac{n_j^{-1/N_{fj}} - (N_{fj})^{-1/N_{fj}}}{-(N_{fj})^{-1/N_{fj}}} \quad (23)$$

$$\frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right)^{\alpha_1-1} + \frac{n_3}{N_{f3}} \left(\frac{N_{f2}}{N_{f3}}\right)^{\alpha_2 \alpha_1-1} \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right)^{\alpha_1-1} + \dots = 1 \quad (24)$$

$$\frac{n_4}{N_{f4}} \left(\frac{N_{f3}}{N_{f4}}\right)^{\alpha_3 \alpha_2 \alpha_1-1} \left(\frac{N_{f2}}{N_{f3}}\right)^{\alpha_2 \alpha_1-1} \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}}\right)^{\alpha_1-1} + \dots = 1$$

分析式(24)可得损伤变量的广义表达式:

$$D_i = \frac{n_1}{N_{fi}} \lambda_i \quad (25)$$

$$\lambda_i = \prod_{j=1}^{i-1} \left(\frac{N_{fj}}{N_{f(i+j)}}\right)^{\left(\prod_{k=1}^i \frac{n_k^{-1/N_{fk}} - N_{fk}^{-1/N_{fk}}}{-N_{fk}^{-1/N_{fk}}}\right)^{-1}}$$

其中,  $\lambda_i$  为载荷效应系数。在此基础上, 可以创建一种考虑材料记忆性能衰退的新疲劳累积损伤

模型:

$$\sum D_i = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_{fi}} \lambda_i = 1 \quad (26)$$

式(26)与 Miner 法则在形式上相似,所以引入  $\lambda_i$  来表示载荷历程效应。

### 2.2 与三种经典模型的预测能力对比

为了检验改进模型的准确性和可靠性,将其与三种传统的疲劳累积损伤模型进行了比较。具体的三种传统模型如下。

#### 2.2.1 Miner 法则

MINER<sup>[23]</sup>提出了以下假设:材料吸收的能量是恒定的,并且损伤是线性叠加的,当临界损伤和为 1 时就发生失效。在数学上可以表示为

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (27)$$

在实际工程中会产生较大误差,总损伤可能不为 1,需要考虑疲劳极限下的小损伤,所以建立修正的 Miner 法则和相对 Miner 法则:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = a \quad (28)$$

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = D_f \quad (29)$$

#### 2.2.2 Corten-Dolan 法则

CORTEN 和 DOLAN<sup>[9]</sup>提出了一种非线性损伤理论。该理论的数学表达式如下:

$$D = mrn \quad (30)$$

其中,  $m$  为损伤核数目;  $r$  为损伤系数;  $n$  为应力循环数;  $a$  为常数。定义损伤变量如下:

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_{fi} (\frac{\sigma_{i,max}}{\sigma_i})^d} = 1 \quad (31)$$

上式中,  $d$  代表材料的一个固有常数,变量  $i$  表示应力水平的序号。可以假定最初级的应力相当于载荷历程中的最高应力值。据此,可以适当调整式(31)以反映这一假设:

$$\sum D_i = \frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \frac{N_{f2}}{N_{f1}} (\frac{\sigma_2}{\sigma_1})^d + \frac{n_3}{N_{f3}} \frac{N_{f3}}{N_{f1}} (\frac{\sigma_3}{\sigma_1})^d + \dots = 1 \quad (32)$$

可得到总损伤为

$$D_i = \frac{n_i}{N_{fi}} \frac{N_{fi}}{N_{f1}} (\frac{\sigma_i}{\sigma_1})^d \quad (33)$$

从上式看出总损伤主要与材料常数  $d$  有关,  $d$  值可由查表获得,当 S-N 曲线的斜率等于  $d$  时, Corten-Dolan 法则变得和 Miner 法则一样。

#### 2.2.3 Kwofie-Rahbar 法则

KWOFIE 和 RAHBAR<sup>[10]</sup>利用疲劳驱动应力的理念来描绘疲劳累积损伤的过程,并通过驱动力等效原理确定了疲劳累计损失的失效标准。这

一过程涉及疲劳累积损伤的逐步积累,最终导致失效的出现:

$$\sum D_i = \frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \frac{\ln(N_{f2})}{\ln(N_{f1})} + \frac{n_3}{N_{f3}} \frac{\ln(N_{f3})}{\ln(N_{f1})} + \dots = 1 \quad (34)$$

结合式(34)可得损伤变量为

$$D_i = \frac{n_i}{N_{fi}} \frac{\ln(N_{fi})}{\ln(N_{f1})} \quad (35)$$

根据上述公式可以观察到,各准则主要关注载荷效应系数  $\lambda$  的不同表现。为了更明确地揭示载荷效应系数与疲劳损伤之间的关系,本文设计了两种不同类型的加载模型,以进一步探讨这种关系:3种高-低加载:  $N_{f1}/N_{f2} = 2, 5, 10$ ; 3种低-高加载:  $N_{f1}/N_{f2} = 0.1, 0.2, 0.5$ , 它们的载荷效应系数比较见表 1。

表 1 五种模型载荷效应系数在不同加载模式下的比较

Tab.1 Comparison of load effect coefficients of five models under different loading modes

编号	模型	载荷效应系数 $\lambda$ (一级加载情况下的 $\lambda_1$ )					
		低-高加载			高-低加载		
		$N_{f1}/N_{f2}$					
		0.2	0.5	0.1	5	2	10
1	Miner 法则 <sup>[23]</sup>	$\lambda = 1$					
2	Corten 模型 <sup>[9]</sup>	$\lambda = \frac{N_{f2}}{N_{f1}} (\frac{\sigma_2}{\sigma_1})^d = (\frac{N_{f1}}{N_{f2}})^{-5.8b-1}$ ( $b$ 为材料参数)					
3	Kwofie 模型 <sup>[10]</sup>	$\lambda = \frac{\ln(N_{f2})}{\ln(N_{f1})}$					
4	文献[24]的材料记忆退化损伤模型	$\lambda = (\frac{N_{f1}}{N_{f2}})^{\frac{\exp(-\frac{n_1}{N_{f1}})}{1-e^{-1}}-1}$					
5	本文改进模型	$\lambda = (\frac{N_{f1}}{N_{f2}})^{\frac{n_1^{-N_{f1}} - N_{f1}^{-N_{f1}}}{-N_{f1}^{-N_{f1}}}-1}$					

根据上述模型,建立不同加载条件下疲劳寿命比与载荷效应系数的关系,观察图 2a 和图 2b 可以发现:当  $\lambda = 1$  时, Corten 模型变为 Miner 法则;当  $-b = 0.172, \lambda = 1$  时,曲线在形式上对称;在高-低加载时,参数  $-b$  与  $\lambda$  成反比;在低-高加载时,参数  $-b$  与  $\lambda$  成正比。观察图 3a 和图 3b 可发现,载荷效应系数  $\lambda$  主要与  $N_{f1}/N_{f2}$  相关,与  $n_1/N_{f1}$  的关联性很小。

## 3 算例及试验验证分析

### 3.1 算例验证

为了验证本文所提模型预测疲劳寿命的准确性,先对试件进行数值模拟仿真,再对两种材料的两级加载试验数据进行验证。两种材料的性能参数见表 2,仿真结果如表 3、图 4 和图 5 所示。

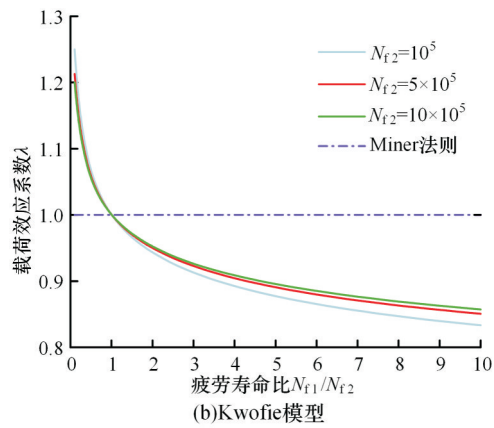
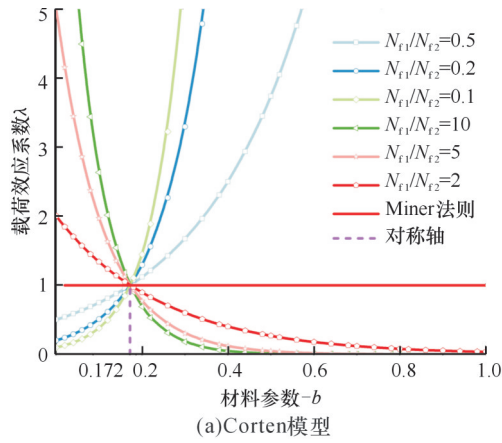


图2 不同加载条件下疲劳寿命比与载荷效应系数的关系  
Fig.2 Relationship between fatigue life ratio and load effect coefficient under different loading conditions

在两种材料的等效应力应变云图中,可以看出两种材料在不同加载条件下应力和应变的最大值都出现在拉伸件的中部,说明该区域是最先发生塑性变形或断裂之处。根据仿真结果计算出两次加载的剩余寿命,见表4。

据文献[16]中试验数据,对30NiCrMoV12<sup>[25]</sup>采用回火和硬化处理,该材料的弹性模量( $E=210$  GPa)、屈服强度(754 MPa)、抗拉强度(1035 MPa)和疲劳极限(391 MPa)等参数都已确定。在MTS810 伺服液压疲劳试验机上用应力控制的方式对材料进行拉-压试验,应力比 $R=-1$ ,30NiCrMoV12 钢<sup>[16]</sup>的试验数据详见表4,30CrMnSiA 钢<sup>[17]</sup>的试验数据见表5。

两种不同材料在5种不同计算模型下,预测寿命与试验寿命的比较结果如图6和图7所示。通过观察可以得出以下结论:大部分数据点(超过80%)都分布在 $\pm 1.5$ 倍的分散带内,并且没有超出 $\pm 2$ 倍的分散带。

通过定量计算不同模型的平均预测误差,该模型的误差均值为0.08,而其他传统模型的误差均值在0.12~0.18之间。这一差异表明修

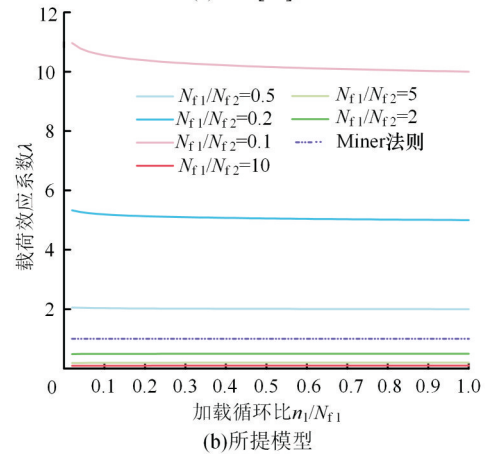
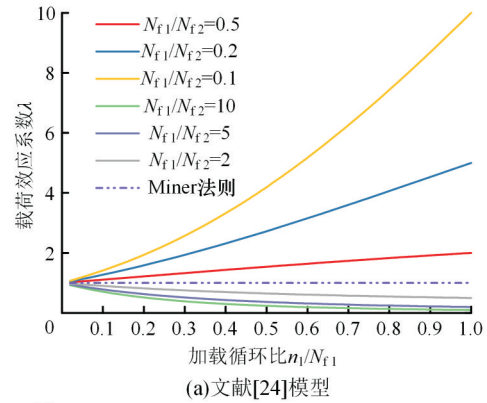


图3 不同加载条件下加载循环比与载荷效应系数的关系  
Fig.3 Relationship between load cycle ratio and load effect coefficient under different loading conditions

表2 两种材料的力学性能参数

Tab.2 Mechanical property parameters of two materials

材料	30NiCrMoV12	30CrMnSiA
弹性模量/GPa	210	210
泊松比	0.28	0.3
密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	7850	7850

表3 两种材料拉伸件数值模拟的应力应变结果

Tab.3 The stress and strain results of numerical simulation of two kinds of material tensile parts

材料	30NiCrMoV12					30CrMnSiA	
	485	465	450	420	400	586	482
加载/MPa	485	465	450	420	400	586	482
应力/MPa	494.11	473.74	458.45	427.9	407.51	596.85	490.93
应变	2.3529	2.2559	2.1831	2.0376	1.9405	2.8421	2.3377

正模型在预测寿命上的误差更小,预测精确度提高了33%~55%。这说明修正后的线性累积损伤新模型相对于传统经典模型具有更高的精确度,在反映损伤动态变化方面具有更明确的物理意义。

然而,由于疲劳寿命具有一定的发散性,且试验数据仅限于15组,故无法通过大样本检验模型的普适性。但通过小样本定量分析,本文模型对两种材料的平均预测误差均小于10%,而传统模

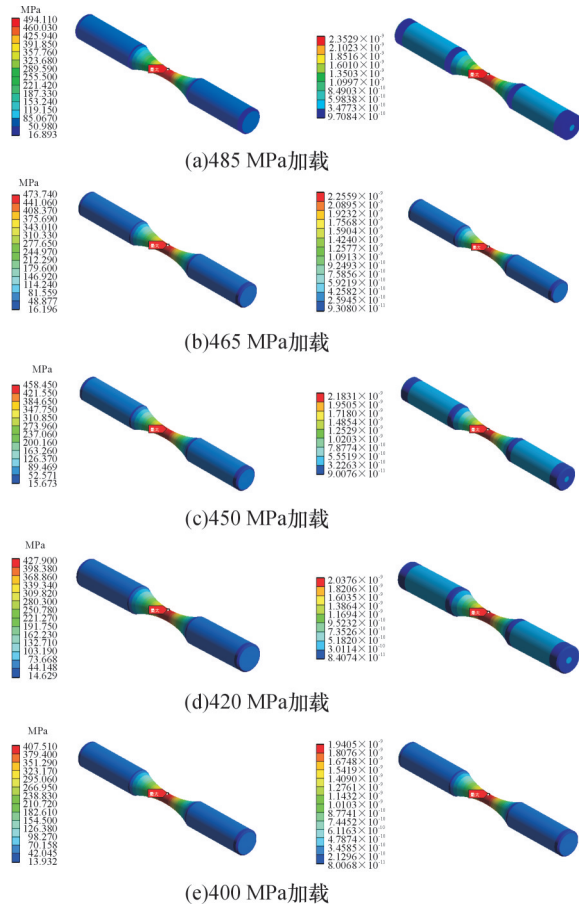


图4 30NiCrMoV12钢的等效应力-应变云图

Fig.4 Equivalent stress-strain nephogram of 30NiCrMoV12 steel

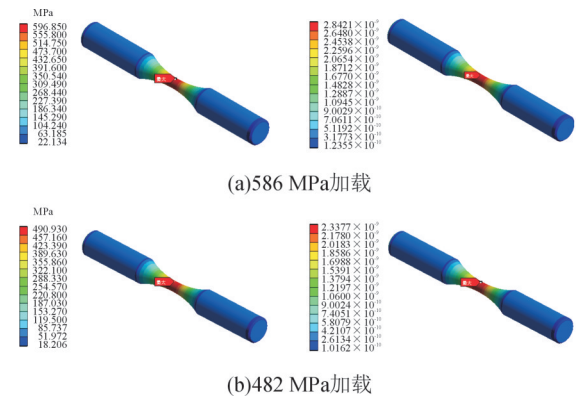


图5 30CrMnSiA钢的等效应力-应变云图

Fig.5 Equivalent stress-strain nephogram of 30CrMnSiA steel

型的平均预测误差大多超过15%。尽管样本规模有限,但从当前数据可以看出,该模型对疲劳寿命的预测结果与实际结果接近度较高,具有较高的工程应用价值。

### 3.2 压裂泵头体材料试验测试

选取一组工况下两级加载的超高压泵头体材料进行试验测试来进一步验证新模型的可靠性,如图8所示。为了更直观地反映预测模型的准确性,使用统计学方法对模型的预测误差进行

表4 30NiCrMoV12钢在两级加载条件下的试验观测结果

Tab.4 Experimental observation results of 30NiCrMoV12 steel under two-stage loading condition

加载次序	应力	编号	循环次数			
			$n_1$	实验结果	本模型计算值	仿真计算值
				$n_2$	$n_2'$	$n_2''$
高-低加载	$\sigma_1 = 485 \text{ MPa}$ $\sigma_2 = 400 \text{ MPa}$	1	12 750	52 306	41 248	53 288
		2	28 500	45 774	27 498	46 634
		3	41 250	16 035	13 749	16 336
	$\sigma_1 = 465 \text{ MPa}$ $\sigma_2 = 420 \text{ MPa}$	4	18 016	66 854	51 040	68 111
		5	35 028	29 614	34 026	30 171
		6	52 121	37 221	17 013	37 921
	$\sigma_1 = 450 \text{ MPa}$ $\sigma_2 = 420 \text{ MPa}$	7	19 081	79 354	60 247	80 844
		8	41 165	23 910	40 165	24 359
		9	59 907	16 035	20 082	16 336
低-高加载	$\sigma_1 = 400 \text{ MPa}$ $\sigma_2 = 485 \text{ MPa}$	10	37 056	52 950	109 310	51 955
		11	74 040	44 975	72 879	44 130
		12	108 890	47 090	36 439	46 205
	$\sigma_1 = 420 \text{ MPa}$ $\sigma_2 = 465 \text{ MPa}$	13	28 230	58 635	85 407	57 533
		14	55 982	57 015	56 938	55 943
		15	85 835	49 168	28 469	48 244
	$\sigma_1 = 420 \text{ MPa}$ $\sigma_2 = 450 \text{ MPa}$	16	27 969	71 031	85 407	69 697
		17	56 989	38 963	56 938	38 231
		18	84 975	11 025	28 469	10 818

表5 30CrMnSiA钢在两级加载下的试验观测结果

Tab.5 Experimental observation results of 30CrMnSiA steel under two-stage loading condition

加载次序	应力	编号	循环次数			
			$n_1$	实验结果	本模型计算值	仿真计算值
				$n_2$	$n_2'$	$n_2''$
高-低加载	$\sigma_1 = 586 \text{ MPa}$ $\sigma_2 = 482 \text{ MPa}$	1	1200	36 911	40 185	37 594
		2	1800	32 450	38 185	33 051
		3	3000	16 002	28 184	16 298
		4	5000	6969	18 183	7098
低-高加载	$\sigma_1 = 482 \text{ MPa}$ $\sigma_2 = 586 \text{ MPa}$	5	13 000	6602	8183	6480
		6	15 000	6501	4531	6381
		7	25 000	5400	3932	5300
		8	35 000	4428	2733	4346
		9	45 000	3254	734	3194

表征,对其预测能力进行定量分析<sup>[26]</sup>,计算公式如下:

$$P = \log(N_p) - \log(N_i) \quad (36)$$

式中: $P$ 为预测误差; $N_p$ 为预测寿命; $N_i$ 为试验寿命。

以超高压泵头体为研究对象,在S-N曲线和本文所提模型的基础上预测其疲劳寿命。预测值与实际值的比较见表6,与其他模型的对比如图9所示。

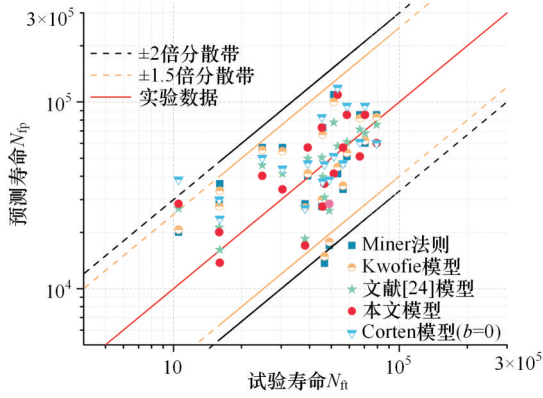


图6 新模型与4种经典模型寿命预测结果对比  
(30NiCrMoV12钢)

Fig.6 Comparison of life prediction results between the new model and four classical models  
(30NiCrMoV12 steel)

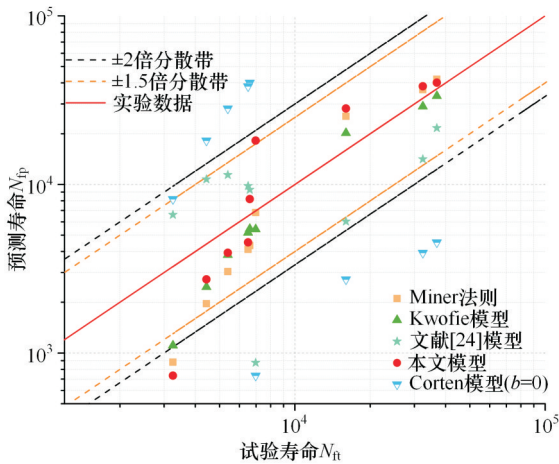


图7 新模型与4种经典模型寿命预测结果对比  
(30CrMnSiA钢)

Fig.7 Comparison of life prediction results between the new model and four classical models  
(30CrMnSiA steel)

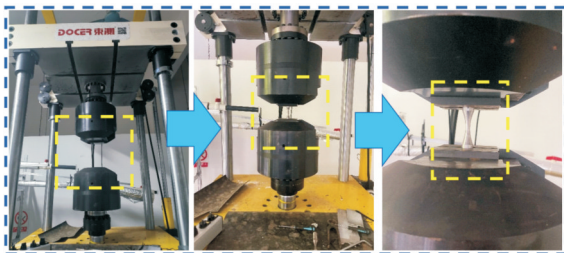


图8 压裂泵头体材料试验测试

Fig.8 Fracturing pump head body material test

分析以上数据可知,在高-低两级加载的情况下,本文所提新型疲劳累积损伤模型预测结果更接近实际工况两级载荷下的真实寿命,预测误差箱线图各参数更接近红色虚线(预测误差为零的线),相对于其他模型,对剩余寿命的预测要更加准确。

表6 实际工况下泵头体的实际寿命与理论寿命比较(两级加载)

Tab.6 Comparison of the actual life and theoretical life of the pump head under actual working conditions (two-stage loading)

加载次序	应力	编号	循环次数		
			$n_1$	实际寿命	本模型预测值
高-低加载	$\sigma_1 = 320 \text{ MPa}$ $\sigma_2 = 270 \text{ MPa}$	1	3300	2019 600	1623 379
		2	3300	2027 520	1623 379
		3	3300	2890 800	1623 379
		4	3300	1642 080	1623 379
		5	3300	2117 280	1623 379
		6	3300	1615 680	1623 379
		7	3300	1547 040	1623 379
		8	3300	2164 800	1623 379
		9	3300	1953 600	1623 379

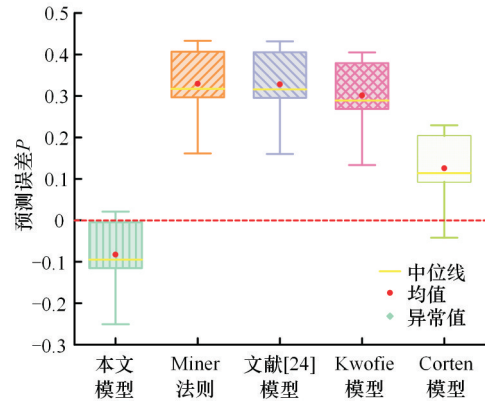


图9 五种模型的预测误差比较箱线图  
(SJB-03型泵头体)

Fig.9 Comparison of prediction error of five models box diagram (SJB-03 pump head)

#### 4 结论

1) 本文结合艾宾浩斯遗忘曲线对材料性能的衰退过程进行分析,提出以幂函数代替指数函数作为记忆函数的数学模型,建立了一种新的材料记忆性能退化模型。

2) 修正后的线性累积损伤模型相较于传统经典模型具有更高的预测精度。通过定量计算不同模型的平均预测误差,该模型的误差均值为0.08,而其他传统模型的误差均值在0.12~0.18之间。这一差异表明修正模型在预测寿命上的误差更小,预测精确度提高了33%~55%。此外,修正模型在反映材料损伤动态变化时误差方差更小,证明它对损伤演化的预测更具有一致性和物理意义。

3)通过小样本定量分析发现,本文模型对两种材料的平均预测误差均小于10%,而传统模型的平均预测误差大多超过15%。尽管样本规模有限,但从当前数据可以看出,该模型对疲劳寿命的预测结果与实际结果接近度较高,具有较高的工程应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 金丹, 韩高枫, 龙浩跃, 等. 316L不锈钢非比例路径疲劳失效的微观机理[J]. 材料研究学报, 2022, 36(11): 845-849.  
JIN Dan, HAN Gaofeng, LONG Haoyue, et al. Micromechanism of Fatigue Failure under Non-proportional Loading for 316L Stainless Steel[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2022, 36(11): 845-849.
- [2] 张朝铭. 激光再制造涂层微观组织及低周疲劳性能研究[D]. 汉中: 陕西理工大学, 2024.  
ZHANG Chaoming). Study on Microstructure and Low-cycle Fatigue Properties of Laser Remanufactured Coatings[D]. Hanzhong: Shaanxi University of Technology, 2024.
- [3] 董瑞, 陈林, 岑耀东, 等. 不同热处理条件下贝氏体钢的微观组织和疲劳裂纹扩展[J]. 金属热处理, 2022, 47(2): 153-158.  
DONG Rui, CHEN Lin, CEN Yaodong, et al. Microstructure and Fatigue Crack Growth of a Bainitic Steel under Different Heat Treatments [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(2): 153-158.
- [4] 董晨辉, 吴博雅, 曾艳, 等. 应变幅对SDHC钢热机械疲劳行为及微观组织演变的影响[J]. 材料工程, 2023, 51(12): 184-190.  
DONG Chenhui, WU Boya, ZENG Yan, et al. Effect of Strain Amplitude on Thermo-mechanical Fatigue Behavior and Microstructure Evolution of SDHC Steel [J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(12): 184-190.
- [5] 贺小帆, 刘文琰, 王忠波, 等. 预腐蚀对30CrMnSiNi2A连接件疲劳寿命影响的试验研究[J]. 机械强度, 2009, 31(4): 664-669.  
HE Xiaofan, LIU Wenting, WANG Zhongbo, et al. pre-corrosion Degradation Influence on the Fatigue Life for 30CrMnSiNi2A Specimen[J]. Journal of Mechanical Strength, 2009, 31(4): 664-669.
- [6] 金平, 王刚, 谭晓明. 裂纹萌生寿命预腐蚀影响规律[J]. 海军航空工程学院学报, 2011, 26(5): 567-570.  
JIN Ping, WANG Gang, TAN Xiaoming. Pre-corrosion Influence Law of the Crack Initiation Life[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2011, 26(5): 567-570.
- [7] 朱顺鹏, 黄洪钟, 谢里阳. 考虑小载荷强化的模糊疲劳寿命预测理论[J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1048-1052.  
ZHU Shunpeng, HUANG Hongzhong, XIE Liyang. Prediction of Fuzzy Fatigue Life under Low Amplitude Loading Strengthening [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(6): 1048-1052.
- [8] 朱晓阳. 疲劳累积损伤理论的研究及其发展[J]. 机械工程材料, 1987, 11(3): 11-16.  
ZHU Xiaoyang. The Study of Fatigue Accumulating Damage Theory and It's Development[J]. Materials for Mechanical Engineering, 1987, 11(3): 11-16.
- [9] CORTEN H T, DOLAN T J. Cumulative Fatigue Damage [C]// Proceedings of the International Conference on Fatigue of Metals, Institution of Mechanical Engineers. London, 1956:235-246.
- [10] KWOFIE S, RAHBAR N. A Fatigue Driving Stress Approach to Damage and Life Prediction under Variable Amplitude Loading [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2013, 22(3): 393-404.
- [11] ZHU Shunpeng, LIAO Ding, LIU Qiang, et al. Nonlinear Fatigue Damage Accumulation: Isodamage Curve-based Model and Life Prediction Aspects [J]. International Journal of Fatigue, 2019, 128: 105185.
- [12] 高凯, 刘纲, 蒋伟. 考虑荷载相互作用的非线性时变疲劳可靠性分析[J]. 铁道学报, 2022, 44(4): 46-53.  
GAO Kai, LIU Gang, JIANG Wei. Analysis of Nonlinear Time-varying Fatigue Reliability Considering Load Interaction[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(4): 46-53.
- [13] SUBRAMANYAN S. A Cumulative Damage Rule Based on the Knee Point of the S-N Curve[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1976, 98(4): 316-321.
- [14] 张拓, 刘坤, 何爱民, 等. 基于动态剩余S-N曲线的线性疲劳寿命预测模型[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(3): 84-93.  
ZHANG Tuo, LIU Kun, HE Aimin, et al. A Linear Fatigue Life Prediction Model Based on Dynamic Residual S-N Curve[J]. Journal of Chongqing University, 2023, 46(3): 84-93.
- [15] 冯炜森, 杨成鹏, 贾斐. 复合材料层压板疲劳损伤演化模型的综述与评估[J]. 材料导报, 2024, 38

- (9): 230-240.  
FENG Weisen, YANG Chengpeng, JIA Fei. Review and Evaluation of Fatigue Damage Evolution Models for Composite Laminates[J]. Materials Reports, 2024, 38(9): 230-240.
- [16] DATTOMA V, GIANCANE S, NOBILE R, et al. Fatigue Life Prediction under Variable Loading Based on a New Non-linear Continuum Damage Mechanics Model[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(2): 89-95.
- [17] 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 Yiqing, HU Mingmin, LUO Yanli. New Continuous Fatigue Damage Model Based on Whole Damage Field Measurement[J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(4): 582-586.
- [18] PENG Zhaochun, HUANG Hongzhong, ZHOU Jie, et al. A New Cumulative Fatigue Damage Rule Based on Dynamic Residual S-N Curve and Material Memory Concept[J]. Metals, 2018, 8(6): 456.
- [19] REJOVITZKY E, ALTUS E. On Single Damage Variable Models for Fatigue[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2013, 22(2): 268-284.
- [20] BÖHM E, KUREK M, ŁAGODA T. Accumulation of Fatigue Damages for Block-type Loads with Use of Material Memory Function[J]. Solid State Phenomena, 2014, 224: 39-44.
- [21] BÖHM E, KUREK M, JUNAK G, et al. Accumulation of Fatigue Damage Using Memory of the Material[J]. Procedia Materials Science, 2014, 3: 2-7.
- [22] ANDERSON R B, TWENEY R D. Artifactual Power Curves in Forgetting[J]. Memory & Cognition, 1997, 25(5): 724-730.
- [23] MINER B M A. Cumulative Damage in Fatigue [J]. Journal of Applied Mechanics, 1945, 12(3): A159-A164.
- [24] 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 Zhaochun. Research on Methods for Structural Life Prediction and Time-dependent Reliability Analysis Using Cumulative Fatigue Damage Theories [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [25] 吴志峯, 高建雄, 徐蓉霞, 等. 考虑载荷交互影响的非均匀损伤累积模型[J]. 中国机械工程, 2023, 34(22): 2659-2664.  
WU Zhifeng, GAO Jianxiong, XU Rongxia, et al. A Non-uniform Damage Accumulation Model Considering Load Interactions[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(22): 2659-2664.
- [26] 刘俭辉, 吴生磊. 基于临界距离理论的缺口件多轴疲劳寿命预测[J]. 西安理工大学学报, 2024, 40(4): 538-544.  
LIU Jianhui, WU Shenglei. Multiaxial Fatigue Life Prediction of Notched Parts Based on the Theory of Critical Distance[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(4): 538-544.

(编辑 陈 勇)

**作者简介:**周思柱,男,1963年生,教授、博士。研究方向为石油机械现代设计技术与方法。zhsz@yangtzeu.edu.cn。曾云\*(通信作者),男,1991年生,副教授、博士。研究方向为压裂装备结构强度可靠性。E-mail:mechanicszy@163.com。

**本文引用格式:**

周思柱,向琼焱,曾云. 考虑材料动态记忆特性的疲劳累积损伤模型[J]. 中国机械工程, 2025, 36(8): 1740-1748.

ZHOU Sizhu, XIANG Qiongyao, ZENG Yun. Fatigue Cumulative Damage Model Considering Dynamic Memory Properties of Materials[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(8): 1740-1748.

(上接第1739页)

- [26] 孙鹏, 李研彪, 张聪, 等. 基于运动性能分析的仿人机械臂尺度优化[J]. 中国机械工程, 2022, 33(19): 2331-2340.  
SUN Peng, LI Yanbiao, ZHANG Cong, et al. Scale Optimization of Humanoid Robotic Arms Based on Kinematic Performance Analysis[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(19): 2331-2340.

(编辑 陈 勇)

**作者简介:**赵星宇,男,1991年生,讲师。研究方向为并联机器人理论及其应用。E-mail: zhaoxy@bistu.edu.cn。

**本文引用格式:**

赵星宇,赵铁石,许博,等. 并联式混合驱动机构运动学和传递性能分析[J]. 中国机械工程, 2025, 36(8): 1730-1739.

ZHAO Xingyu, ZHAO Tieshi, XU Bo, et al. Kinematics and Transmission Performance Analyses of Parallel Hybrid Drive Mechanisms [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(8): 1730-1739.