

考虑耦合损伤的高低周复合疲劳寿命预测模型^{*}

COMBINED HIGH AND LOW CYCLE FATIGUE LIFE PREDICTION MODEL TAKING ACCOUNT OF COUPLED DAMAGE

刘朋帅^{**} 王晓玮^{***} 侯 军

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

LIU PengShuai WANG XiaoWei HOU Jun

(School of Mechanical and Automotive Engineering,

Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

摘要 燃气轮机叶片等机械零部件在工作过程中常受到由低频离心力导致的低周疲劳和由高频振动引起的高周疲劳的共同作用,高低周复合疲劳损伤是其发生破坏的重要因素之一。高低周复合载荷条件下产生的损伤不再是简单的损伤叠加,还需要考虑高周载荷和低周载荷交互作用产生的耦合损伤。在 Miner 理论的基础上考虑高低周复合载荷引起的耦合损伤,建立高低周复合疲劳寿命预测模型。经过实验验证,对比所提出的模型与 Miner 模型、Trufyakov-Kovalchuk 模型的预测效果,结果表明,提出的模型有较好的预测精度。

关键词 高低周复合疲劳 耦合损伤 疲劳寿命 低周疲劳 高周疲劳

中图分类号 V215.5

Abstract Mechanical parts such as gas turbine blades are often subjected to low cycle fatigue caused by low-frequency centrifugal force and high cycle fatigue caused by high-frequency vibration loads during the working process, and the damage caused by the combined cycle loadings is one of the important factors for fatigue. The damage generated under the combined high and low cycle loading is not a simple damage superposition, and the coupled damage due to the interaction of high and low cycle loading also needs to be considered. On the basis of Miner's rule, through considering the coupled damage caused by the interaction between high and low cycle loading, combined high and low cycle fatigue life prediction model was established. The proposed model was compared with the Miner model and the Trufyakov-Kovalchuk model through the material test data. The results show that the proposed model has a good prediction accuracy.

Key words Combined high and low cycle fatigue; Coupled damage; Fatigue life; Low cycle fatigue; High cycle fatigue

Corresponding author: WANG XiaoWei, E-mail: wangxw@sues.edu.cn, Tel: +86-21-67791180

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52005319), and the Shanghai Youth Science and Technology Talents Sailing Program (No. 20YF1415400).

Manuscript received 20220727, in revised form 20221219.

0 引言

疲劳破坏是机械零部件常见的失效模式,由于疲劳破坏前通常没有明显的预兆,不容易被发现,疲劳破坏往往会造成较大的损失,因此,疲劳破坏成为机械部件损坏的重点研究领域^[1-4]。在燃气轮机的关键零部件的损伤中,叶片受到由低频离心力产生的低周载荷和高频振动产生的高周载荷共同作用,高低周载荷叠加导致准确地进行材料损伤评估更加困难,由低周疲

劳和高周疲劳共同作用产生的高低周复合疲劳成为了燃气轮机叶片发生破坏断裂的主要原因^[5-8],研究高低周复合疲劳寿命的预测成为机械部件可靠性设计的前提和关键^[9-10]。

近年来,越来越多的学者关注疲劳寿命预测的问题。段恒等^[11]对表面处理的飞机起落架疲劳寿命预测实际问题进行研究,考虑应力梯度和表面处理等因素的影响,基于修正的应变-寿命预测曲线提出了飞机起落架的疲劳寿命预测模型,该寿命预测模型能预测

^{*} 20220727 收到初稿, 20221219 收到修改稿。国家自然科学基金项目 (52005319), 上海市青年科技英才扬帆计划 (20YF1415400) 资助。

^{**} 刘朋帅, 男, 1998 年生, 河南驻马店人, 汉族, 上海工程技术大学机械与汽车工程学院硕士研究生, 主要研究方向为疲劳强度、寿命预测。

^{***} 王晓玮 (通信作者), 女, 1988 年生, 河北邯郸人, 汉族, 上海工程技术大学机械与汽车工程学院讲师, 博士, 主要研究方向为高周多轴疲劳、高温疲劳。

低周和中高周疲劳寿命。章的等^[12]进行发动机燃气涡轮叶片低周循环疲劳试验,研究试验中涡轮叶片应力应变情况,分析发现燃气涡轮叶片的主要失效模式是以应变疲劳控制的低周循环疲劳破坏,根据线性损伤累积原理预测了涡轮叶片的低周循环疲劳寿命,并提出了一种涡轮叶片低周循环疲劳试验的设计方法。赵振华等^{[13][14]629-632}为了探究高低周复合载荷对 TC11 钛合金疲劳性能的影响,进行了低周疲劳、高周疲劳和高低周复合疲劳实验,发现高低周复合循环会降低 TC11 钛合金的疲劳寿命,其中低周循环引起的滑移是导致高低周复合载荷疲劳寿命降低的主要原因,采用线性累积损伤准则预测材料疲劳寿命结果偏危险,而非线性累积损伤准则的预测结果更安全准确。

高低周复合疲劳寿命预测模型的建立成为评估材料疲劳损伤的重要依据,Miner 理论是复合疲劳寿命预测中运用最广泛的方法,该方法认为高低周复合加载下的损伤是相互独立的,当高周加载和低周加载造成的总损伤达到损伤临界值的时候材料就会发生疲劳破坏^{[15]159-164}。Miner 理论计算过程简单,没有考虑高周加载叠加到低周加载上时造成的耦合损伤。MANSON S S 等^[16]在 Miner 理论的基础上,通过引入损伤指数和材料常数,提出非线性损伤累积模型。TRUFYAKOV V I 等^{[17]1303-1308[18]}根据单轴加载弯曲疲劳实验,分析高周循环和低周循环的频率和应力比与复合疲劳寿命之间的关系,提出了在双频加载下复合疲劳寿命的非线性预测模型。ZHAO Z H 等^{[19]73-84}基于高低周复合载荷下 TC11 钛合金的疲劳寿命实验结果,分析了影响高低周复合疲劳寿命的因素,发现线性累积损伤模型误差较大,预测结果偏于冒险,通过对非线性累积损伤模型进行修正,得到了预测结果更准确、精度更高的高低周复合疲劳寿命预测模型。ZHU S P 等^{[20]698}基于 Miner 理论,考虑到高低周复合加载中的低周加载和高周加载共同作用产生的耦合损伤,在纯高周疲劳寿命的基础上,分析高周疲劳和低周疲劳的加载系数对耦合损伤部分的影响,从而对耦合损伤进行建模得到一个新的高低周复合疲劳损伤累积模型。幸杰等^[21]基于连续损伤力学的经典损伤理论和不可逆热力学理论,研究了高周疲劳和低周疲劳载荷下的损伤演化模型,推导并建立了考虑高低周疲劳相互作用的高低周复合疲劳损伤模型。李洪松等^{[22]7-13}在高低周载荷叠加形成的耦合损伤建立的高低周复合疲劳寿命预测模型基础上,引入了弱化函数来描述某些低幅值高周载荷对复合损伤的弱化作用,建立了一个具有低载强化效应的高低周复合疲劳寿命预测模型。

本文为了考虑高低周复合加载引起的耦合损伤对疲劳寿命的影响,通过分析高低周疲劳载荷参数和耦

合损伤的关系,用高周疲劳寿命、低周疲劳寿命、高周循环应力比、高低周循环应力幅值和高低周循环频率比的共同作用来表示耦合损伤,提出一种新的高低周复合疲劳寿命预测模型。通过分析比较实验结果与 Miner 理论、Trufyakov-Kovalchuk 模型和提出的模型的预测结果,提出的模型对于高低周复合疲劳寿命的预测结果更准确,预测精度更高,可为燃气轮机涡轮叶片等关键部件的抗疲劳设计提供依据。

1 寿命预测模型背景

燃气轮机涡轮叶片等零部件的损坏常见原因是疲劳破坏,叶片受到大振幅的低频离心力和小振幅的高频振动的共同作用,该共同作用会降低材料的疲劳寿命,燃气轮机叶片等的高低周复合疲劳寿命问题是学者研究和探索的重点^[23-24]。高低周复合加载的载荷谱如图 1 所示^{[14]629-632 [20]698 [22]7-13},高低周复合加载中低频离心力产生的低周载荷常用梯形波表示,高频振动产生的高周载荷常用正弦波或三角形波表示。如图 1 所示,将 m 个高周载荷波叠加到低周载荷波上就能得到高低周复合加载的载荷谱,图 1 中 $\Delta\sigma_H$ 是高周载荷的应力范围; $\Delta\sigma_L$ 是低周载荷的应力范围; f_H 是高周载荷的应力频率; f_L 是低周载荷的应力频率。

图 1 所示为高低周复合载荷谱,高低周应力频率之比 m 为

$$m = \frac{f_H}{f_L} \quad (1)$$

高低周应力幅值之比 α 为

$$\alpha = \frac{\sigma_{a,H}}{\sigma_{a,L}} \quad (2)$$

式中, $\sigma_{a,H}$ 为高周循环的应力幅值; $\sigma_{a,L}$ 为低周循环的应力幅值。

高周循环应力比 R 为

$$R = \frac{\sigma_{m,H} - \sigma_{a,H}}{\sigma_{m,H} + \sigma_{a,H}} \quad (3)$$

式中, $\sigma_{m,H}$ 为高周循环的平均应力。

对于复合疲劳寿命的预测,Miner 理论是使用最广泛的线性累积损伤模型^{[15]159-164},即

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{N_i} \quad (4)$$

式中, m_i 为应力幅值为 σ_i 情况下的循环加载次数; N_i 为应力幅值为 σ_i 情况下的失效循环数;当 $D=1$ 的时候材料达到损伤临界值发生疲劳破坏。

在图 1 所示的高低周复合加载情况下,复合加载载荷谱中的高周加载和低周加载的应力幅值是恒定的,因此一个复合载荷块造成的疲劳损伤用 Miner 理论可表示为

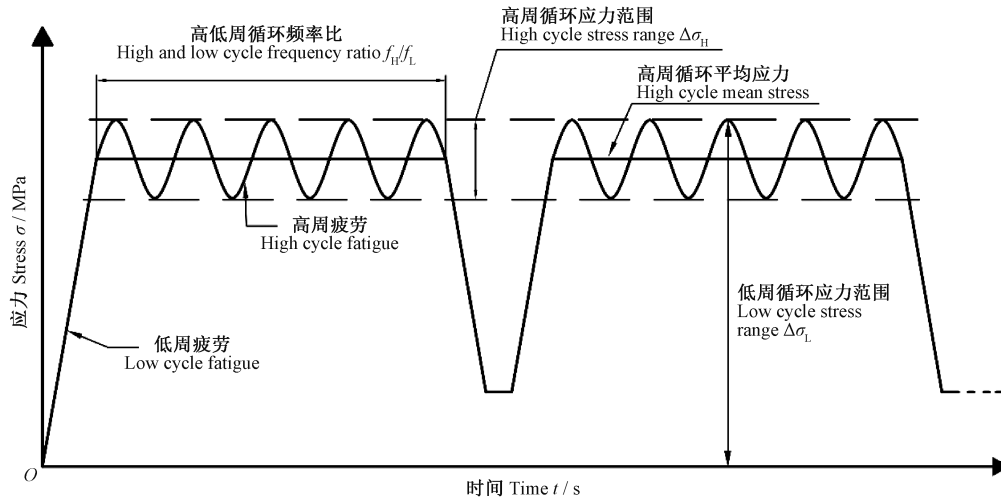


图 1 高低周复合载荷谱

Fig. 1 Combined high and low cycle fatigue load spectrum

$$D_B = \frac{1}{N_L} + \frac{m}{N_H} \quad (5)$$

式中, N_L 为应力幅值为 $\sigma_{a,L}$ 的低周加载下循环失效次数; N_H 为应力幅值为 $\sigma_{a,H}$ 的高周加载下循环失效次数; D_B 为一个复合载荷块造成的疲劳损伤。

由于高低周复合疲劳载荷谱中的高周载荷和低周载荷的应力幅值是恒定的, 因此经历 N 个复合载荷块时, 材料的累积损伤为

$$D = ND_B = N\left(\frac{1}{N_L} + \frac{m}{N_H}\right) \quad (6)$$

当材料达到损伤临界值 $D=1$ 时, 发生疲劳破坏, 此时材料高低周复合加载循环失效次数为

$$N_C = (1+m) / \left(\frac{1}{N_L} + \frac{m}{N_H}\right) \quad (7)$$

式中, N_C 为高低周复合加载循环失效次数。

为了提高高低周复合加载疲劳寿命预测结果的准确性, Trufyakov 和 Kovalchuk 根据单轴加载疲劳测试进行多组双频载荷疲劳寿命实验, 分析高低周载荷因子对复合疲劳寿命的影响, 提出了在双频加载下高低周复合加载疲劳寿命预测模型^{[17] 1303-1308[19] 73-84}:

$$N_C = (1+m) N_L \left(\frac{1}{m}\right)^{\frac{\gamma \sigma_{a,H}}{\sigma_C}} \quad (8)$$

式中, γ 为材料常数; σ_C 为高低周复合循环载荷的总应力范围。

高低周复合加载产生的疲劳损伤除了与低周加载疲劳损伤和高周加载疲劳损伤有关, 由高周循环载荷叠加到低周循环载荷产生的耦合损伤对高低周复合加载疲劳损伤也有重要影响, 研究表明, 高低循环载荷的叠加增加了材料的裂纹扩展速率, 进而降低材料的疲劳寿命^{[25] 792-801}。本文通过分析高低周载荷因子与耦合损伤之间的联系, 基于 Miner 准则, 提出高低周复合

加载情况下一种新的耦合损伤因子来计算耦合损伤, 从而更准确可靠地预测高低周复合疲劳寿命。

2 高低周复合疲劳寿命预测模型的提出

本文基于 Miner 理论, 考虑高低周复合载荷下耦合损伤对疲劳寿命的影响, 提出如下形式的高低周复合疲劳寿命预测模型:

$$D_B = \frac{1}{N_L} + \frac{m}{N_H} + D_C \quad (9)$$

式中, D_C 为耦合损伤。如表 1 所示^{[14] 629-632[22] 7-13}, 通过对高低周复合疲劳实验结果与 Miner 理论的预测寿命进行对比分析, 得出误差为

$$I = \frac{N_M - N_e}{N_e} \quad (10)$$

式中, N_e 为实验得到的高低周复合疲劳寿命; N_M 为 Miner 理论预测的高低周复合疲劳寿命。

由表 1 可以看出, Miner 预测的寿命结果整体上大于实验结果, 误差 I 总体上大于 0, 这是由于 Miner 理论在预测寿命的时候没有考虑耦合损伤对材料疲劳寿命的影响, 因此本文引入耦合损伤 D_C 。耦合损伤是由低周循环上面叠加的高周循环产生的, 通过对数据和误差进行分析可以看出, 高低周复合循环中耦合损伤与低周疲劳损伤、高周疲劳寿命、高周循环应力比、高低周循环应力幅值比和高低周循环频率比等因素有关。

低周循环使材料表面发生挤压和压碎引起裂纹, 此时叠加在低周循环上的高周循环会加速裂纹的扩展, 导致材料疲劳寿命降低。较大的低周循环应力会产生较大的初始破坏, 同时每个载荷块中的高周循环次数决定了低周循环发生裂纹后, 材料是否有时间使得裂纹扩展恢复, 频繁的低周循环会造成的额外的耦

合损伤,对随后的裂纹扩展起到促进作用^{[25]792-801}。因此本文提出耦合损伤 D_c 为

$$D_c = \frac{1}{N_L} K \quad (11)$$

式中, D_c 为高低周复合加载一个载荷块产生的耦合损伤; K 为耦合损伤系数。

在高周循环平均应力 $\sigma_{m,H}$ 和高周循环应力比 R 不变的情况下,高低周循环频率比与 Miner 理论预测疲劳寿命的误差如图 2(a)、图 2(b) 所示,高低周循环频率比 m 越大,则 Miner 理论预测疲劳寿命的误差就越小。

对表 1 中的数据进行分析,研究高周循环应力比 R 和高周循环应力幅值比 α 对耦合损伤产生的影响,如图 2(c)、图 2(d) 所示,在高周循环的平均应力

$\sigma_{m,H}$ 和高周循环频率比 m 不变的情况下,当高周循环应力比 R 较小时,高周循环加载的应力幅较大,Miner 理论预测疲劳寿命和实验得到的疲劳寿命之间误差较小,此时耦合损伤对材料高低周复合疲劳损伤影响不明显,低周疲劳寿命和高周疲劳寿命是引起材料高低周复合疲劳失效破坏的主要原因,耦合损伤在材料的复合加载疲劳损伤中对疲劳寿命产生的影响降低;相反,当高周循环应力比 R 较大的时候,Miner 理论预测疲劳寿命和实验得到的疲劳寿命之间误差较大,此时耦合损伤对材料高低周复合疲劳损伤影响明显,高周循环加载的应力幅值较小,低周疲劳损伤、高周疲劳损伤和耦合损伤都是引起材料高低周复合疲劳失效破坏的重要原因。

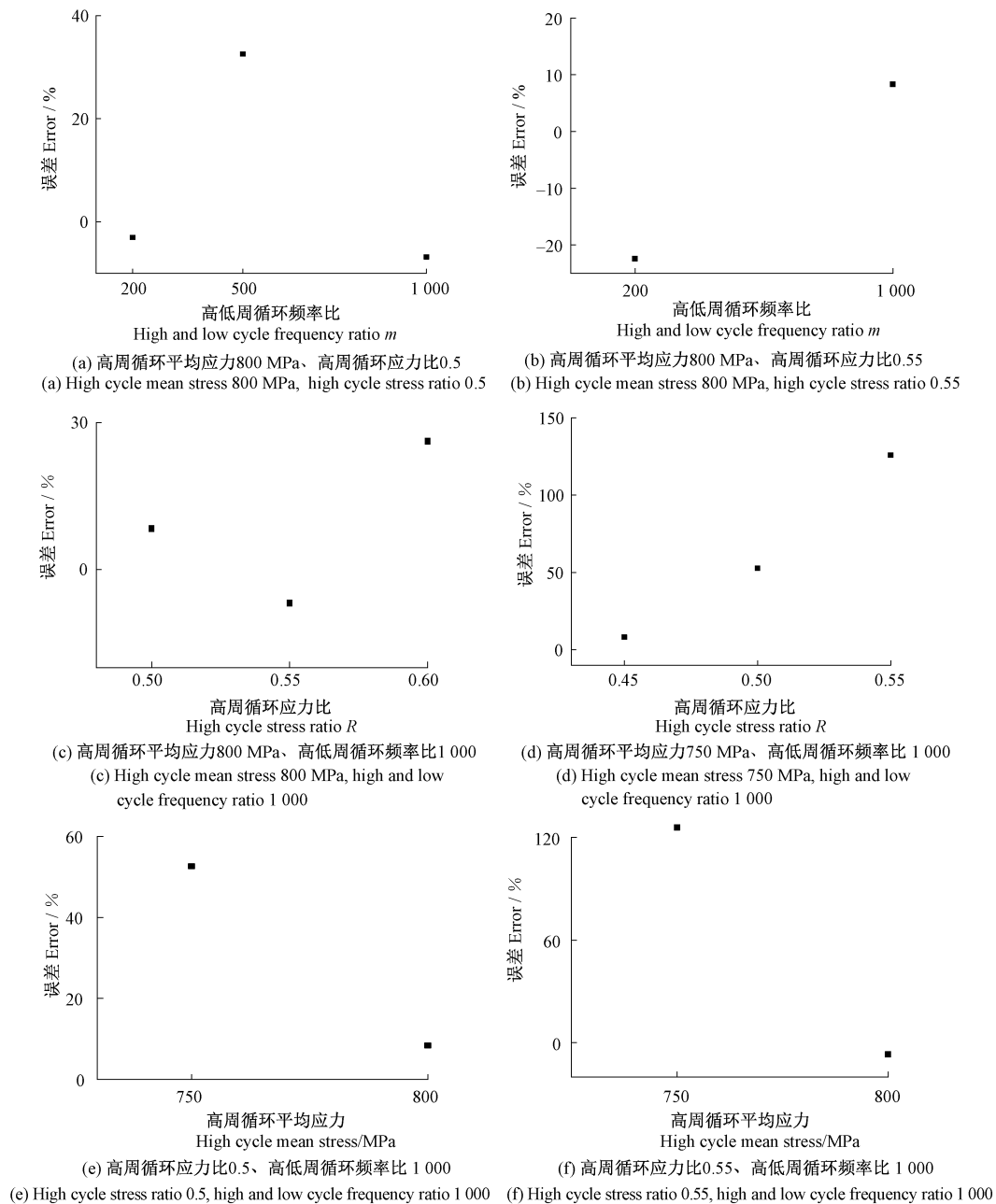


图2 载荷因素与误差的关系

Fig. 2 Relation between load factors and errors

如图 2(e)、图 2(f) 所示,高周循环应力比 R 和 高低周循环频率比 m 不变的情况下,当高周循环的平均应力 $\sigma_{m,H}$ 较小时,Miner 理论预测疲劳寿命和实验得到的疲劳寿命之间误差较大,说明耦合损伤对材料高

低周复合疲劳损伤影响较明显;反之,当高周循环的平均应力 $\sigma_{m,H}$ 较大时,Miner 理论预测疲劳寿命和实验得到的疲劳寿命之间误差较小,此时耦合损伤对材料高低周复合疲劳损伤影响不明显。

表 1 高低周复合疲劳测试参数和试验结果

Tab. 1 Combined high and low cycle fatigue test parameters and test results

高周循环平均应力 High cycle mean stress/MPa	高周循环应力比 High cycle stress ratio R	高低周循环频率比 High and low cycle frequency ratio m	试验结果 Test results	Miner 理论 Miner's rule	误差 Error/%
800	0.5	1 000	64 765	70 163	8.33
800	0.5	200	64 594	50 114	-22.42
800	0.55	1 000	203 154	189 314	-6.81
800	0.55	500	128 563	170 425	32.56
800	0.55	200	135 382	131 285	-3.03
800	0.6	1 000	391 530	494 283	26.24
750	0.45	1 000	85 022	91 932	8.13
750	0.5	1 000	185 674	283 338	52.60
750	0.55	1 000	430 825	972 847	125.81

通过上述分析的高低周循环频率比、高周循环应力比和高低周循环应力幅值比对耦合损伤造成的影响,提出耦合损伤因子 K ,即

$$K = \left(\frac{R}{\alpha} \lg N_H \right)^{\frac{1}{m}} \quad (12)$$

式中, m 为高低周循环频率比; R 为高周循环应力比; α 为高周循环应力幅值与低周循环应力幅值的比值。

由式(11)、式(12)可以得到一个高低周复合加载块引起的耦合损伤为

$$D_C = \frac{1}{N_L} \left(\frac{R}{\alpha} \lg N_H \right)^{\frac{1}{m}} \quad (13)$$

由式(6)、式(7)、式(13)可以得到考虑耦合损伤的高低周复合疲劳寿命为

$$N_C = (1 + m) \left[\frac{1}{N_L} + \frac{m}{N_H} + \frac{1}{N_L} \left(\frac{R}{\alpha} \lg N_H \right)^{\frac{1}{m}} \right] \quad (14)$$

3 实验验证

为验证提出的模型预测高低周复合疲劳寿命的准确性,采用材料 LY12-CZ 铝合金^{[26]101-104},2024-T3 铝合金^[27],45 钢^{[26]101-104},TC11 钛合金^{[19]73-84}4 种材料的实验数据进行分析验证,将实验数据分别代入 Miner 理论、Trufyakov-Kovalchuk (T-K) 模型和提出的模型进行验证,比较 3 种模型预测得到的高低周复合疲劳寿命。其中 T-K 模型中的常数 γ 的取值与材料有关,LY12-CZ 铝合金和 2024-T3 铝合金的 γ 取值为 1.3^{[17]1303-1308};TC11 钛合金的 γ 取值为 1.6^{[14]629-632};由文献[17]¹³⁰³⁻¹³⁰⁸ 可知,低碳钢的材料常数 γ 取值为 1.3;高碳钢的材料常数 γ 取值为 1.7;45 钢为中碳钢,材料常数 γ 的取值范围为 1.3~1.7,分别取最大值 1.7 和最小值 1.3 代入 T-K 模型计算。

将实验结果与模型预测结果进行比较,如图 3 所示,发现 Miner 理论预测的疲劳寿命比实验结果往往会偏大,导致材料在实际使用过程中还没达到预测寿命就可能发生破坏,预测结果偏于危险。对于不同的金属材料,T-K 模型预测的疲劳寿命有时会偏大,有时偏小。与 Miner 理论和 T-K 模型的预测结果相比较,提出的模型预测的疲劳寿命更接近实验结果,具有更高的准确性和可靠性。

对 LY12-CZ 铝合金材料比较结果分析,其中 Miner 理论预测疲劳寿命的 10 组数据中有 7 组数据在 ± 1.5 倍寿命误差和 ± 2 倍寿命误差之间,剩余 3 组数据在 ± 2 倍寿命误差之外,并且所有的寿命预测结果都大于实验结果;而 T-K 模型预测疲劳寿命的 10 组数据中有 4 组数据在 ± 1.5 倍寿命误差之内,6 组数据在 ± 1.5 倍寿命误差和 ± 2 倍寿命误差之间,同样所有的寿命预测结果都大于实验结果;提出的模型预测疲劳寿命 10 组数据都在 ± 1.5 倍寿命误差之内。对 2024-T3 铝合金材料,Miner 理论预测疲劳寿命的 4 组数据中有 2 组数据在 ± 1.5 倍寿命误差之内,2 组数据在 ± 1.5 倍寿命误差和 ± 2 倍寿命误差之间,寿命预测结果都偏大;T-K 模型预测疲劳寿命的 4 组数据中,3 组数据在 ± 1.5 倍寿命误差之内,1 组数据在 ± 1.5 倍寿命误差和 ± 2 倍寿命误差之间;提出的模型疲劳寿命预测的 4 组数据中,1 组数据在 ± 1.5 倍寿命误差和 ± 2 倍寿命误差之间,剩余 3 组数据都在 ± 1.5 倍寿命误差之内。对于材料 45 钢分析,Miner 理论预测疲劳寿命的所有结果都在 ± 2 倍寿命误差之外;T-K 模型预测疲劳寿命的 9 组数据中,当材料常数 γ 取值为 1.3 时,1 组数据在 ± 2 倍寿命误差之外,剩余 8 组数据在 ± 1.5 倍寿命误差和 ± 2 倍寿命误差之间;当材料常数 γ 取值为 1.7

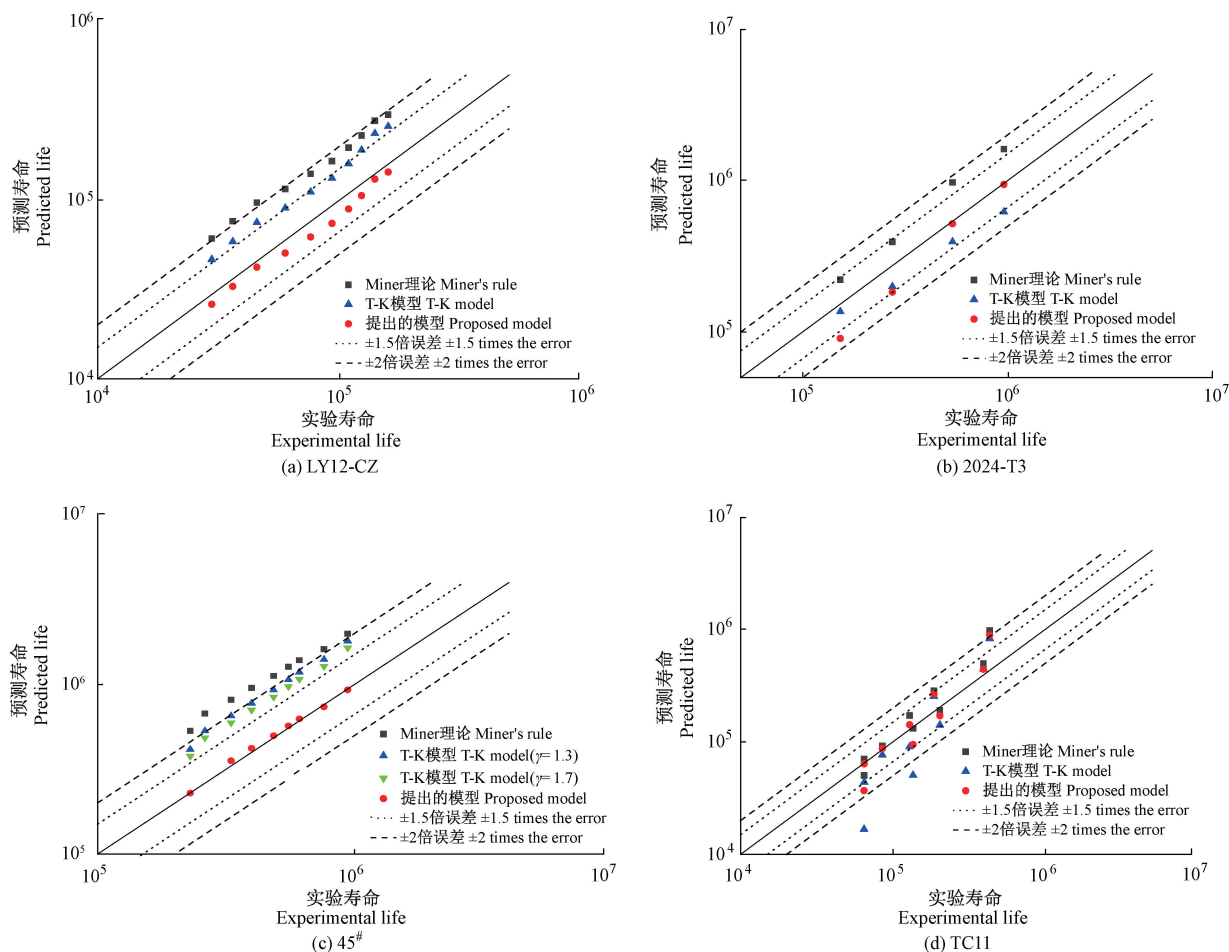


图3 实验寿命与模型预测寿命的比较

Fig. 3 Comparison between experimental life and model prediction life

时,所有结果都在 ± 1.5 倍寿命误差和 ± 2 倍寿命误差之间;而提出的模型预测的9组数据都在 ± 1.5 倍寿命误差之内。对于TC11钛合金材料,Miner理论预测疲劳寿命的9组数据中,有7组数据在 ± 1.5 倍寿命误差之内,1组数据在 ± 1.5 倍寿命误差和 ± 2 倍寿命误差之间,1组数据在 ± 2 倍寿命误差之外,Miner理论预测TC11钛合金疲劳寿命的结果可以接受;T-K模型预测疲劳寿命的9组数据中,有5组数据在 ± 1.5 倍寿命误差之内,2组数据在 ± 1.5 倍寿命误差和 ± 2 倍寿命误差之间,2组数据在 ± 2 倍寿命误差之外;提出的模型预测的9组数据中,有7组数据在 ± 1.5 倍寿命误差之内,剩余2组数据在 ± 1.5 倍寿命误差和 ± 2 倍寿命误差之间。通过对4种材料的实验结果和模型预测寿命比较,可以发现,提出的模型的预测结果更准确,对于4种材料预测得到的疲劳寿命都能够被接受。因此,总体上提出的模型的预测结果更准确,预测疲劳寿命的误差更小。

对模型预测结果进行统计分析,以量化模型预测误差 P_{error} ^[28]。模型预测误差由对数模型预测寿命和对数实验结果之间的差得到

$$P_{\text{error}} = \lg N_{\text{fp}} - \lg N_{\text{ft}} \quad (15)$$

式中, N_{fp} 为模型预测得到的高低周复合疲劳寿命; N_{ft} 为实验得到的高低周复合疲劳寿命。

模型预测误差绘制箱体图如图4所示。从图4可以看出,Miner理论预测的LY12-CZ铝合金、2024-T3铝合金和45钢疲劳寿命误差偏大,且Miner理论预测以上3种材料疲劳寿命都大于实际使用中的疲劳寿命,预测结果偏于危险,对于TC11钛合金材料,Miner理论预测结果接近实验数据,该模型预测TC11钛合金的结果可以接受。T-K模型预测的LY12-CZ铝合金和45钢疲劳寿命偏长,预测的2024-T3铝合金疲劳寿命偏短,预测的TC11钛合金疲劳寿命误差结果在可接受范围,但比Miner理论和提出的模型的分散度高。提出的模型预测的4种材料的疲劳寿命的误差结果都在可接受范围内,对于2024-T3铝合金的误差结果分散度比Miner理论和T-K模型高些,但是整体上预测结果比两个模型更准确,更接近实验结果,且离散较小。

为了进一步比较3种模型预测结果的准确性,引入了平均相对误差^[29]:

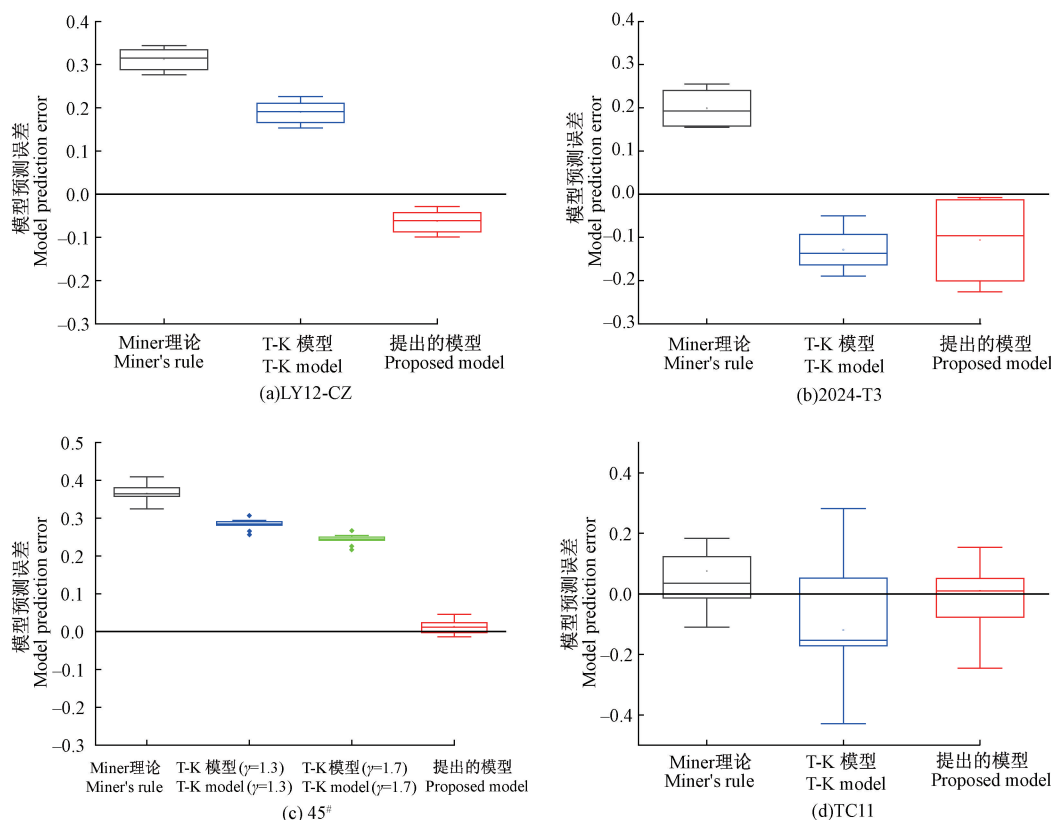


图 4 实验结果与模型预测之间的误差

Fig. 4 Errors between experimental result and model predictions

$$e_{\text{MRE}} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \left| \frac{N_{\text{fp}} - N_{\text{ft}}}{N_{\text{ft}}} \right| \quad (16)$$

式中, N_{fp} 为模型预测得到的高低周复合疲劳寿命; N_{ft} 为实验得到的高低周复合疲劳寿命; T 为实验总数目。

根据式(16)分别计算 Miner 理论、T-K 模型和提出的模型的平均相对误差值,结果如图 5 所示。45 钢的 T-K 模型有 2 组平均相对误差值,这是由于 45 钢的 γ 值分别取最小值 1.3 和最大值 1.7 得出的。与 Miner 理论相比,T-K 模型和提出的模型预测结果更准确,对 4 种材料整体分析,提出的模型的平均相对误差值最小。

综合以上几种材料的实验结果和 3 种模型的预测结果分析比较可以得出,提出的模型的预测结果最接近实验疲劳寿命,具有较高的预测精度和稳定性。

4 结论

通过对高低周复合疲劳寿命实验分析,基于 Miner 理论,通过考虑低周疲劳寿命、高周疲劳损伤、高周应力比、高低周循环应力幅值和高低周循环频率比等因素对高低周复合疲劳耦合损伤的影响,提出了一种新的高低周复合疲劳寿命预测模型,并采用 LY12-CZ 铝合金、2024-T3 铝合金、45 钢和 TC11 钛合金的实验数据进行验证,对 Miner 理论、T-K 模型和提出的模型的预测效果进行比较,得出以下结论:

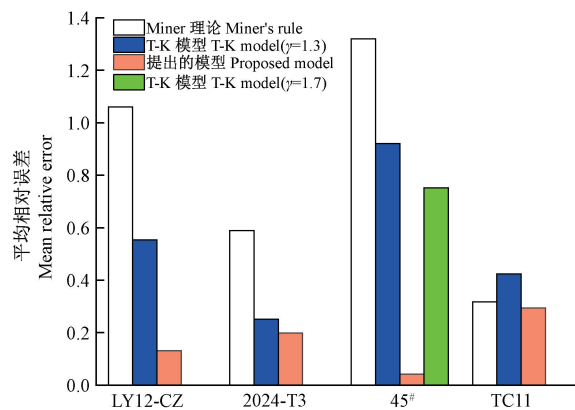


图 5 Miner 理论、T-K 模型和提出的模型预测不同材料疲劳寿命的平均相对误差

Fig. 5 Mean relative errors of the predicted life by Miner's rule, T-K model and proposed model beneath different materials

1) 在 Miner 理论的基础上,通过考虑高周循环叠加在低周循环上产生的耦合损伤对疲劳寿命的影响,提出了一种新的高低周复合疲劳寿命预测模型,该模型考虑了高低周载荷因素对耦合损伤的影响。

2) 通过比较实验寿命和模型的预测结果,可以看出,Miner 理论预测的疲劳寿命往往会偏大,从而高估了材料的疲劳寿命,预测结果偏于危险;T-K 模型对于不同的材料预测的疲劳寿命结果也不相同,有的材料预测得到的疲劳寿命偏大,有的材料预测得到的疲劳寿命偏小;提出的模型的疲劳寿命预测结果和实验寿

命更接近,有更高的预测精度,且离散度较小,具有较好的稳定性。

参考文献 (References)

- [1] 轩福贞,朱明亮,王国彪. 结构疲劳百年研究的回顾与展望[J]. 机械工程学报, 2021, 57(6): 26-51.
XUAN FuZhen, ZHU MingLiang, WANG GuoBiao. Retrospect and prospect on century-long research of structural fatigue[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(6): 26-51 (In Chinese).
- [2] 张国庆,王成焘,徐滨士. 几种疲劳寿命预测方法的探讨及评价[J]. 机械强度, 2011, 33(3): 469-474.
ZHANG GuoQing, WANG ChengTao, XU BinShi. On assessment of several fatigue life prediction methods[J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(3): 469-474 (In Chinese).
- [3] 丁思源,马 蕾,石含波,等. 低温环境对高速列车制动盘材料疲劳裂纹扩展性能影响研究[J]. 机械强度, 2022, 44(5): 1082-1090.
DING SiYuan, MA Lei, SHI HanBo, et al. Study on influence of low temperature environment on fatigue crack growth performance of high-speed railway brake disc material[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(5): 1082-1090 (In Chinese).
- [4] 方 杰,陈 平,高 攀,等. 2024 铝合金喷丸残余应力松弛规律研究[J]. 机械强度, 2022, 44(4): 808-812.
FANG Jie, CHEN Ping, GAO Pan, et al. Relaxation rule for shot peening residual stress of 2024 aluminum alloy[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(4): 808-812 (In Chinese).
- [5] ZHANG W. Technical problem identification for the failures of the liberty ships[J]. Challenges, 2016, 7(2): 20.
- [6] TANG Z Z, CHEN Z, HE Z X, et al. Experimental and numerical study of combined high and low cycle fatigue performance of low alloy steel and engineering application[J]. Materials, 2021, 14(12): 3395.
- [7] 苏运来,陆 山,董登科,等. 非对称载荷下的应力疲劳寿命模型[J]. 机械强度, 2021, 43(2): 397-403.
SU YunLai, LU Shan, DONG DengKe, et al. Stress-based fatigue life model under asymmetrical loads[J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(2): 397-403 (In Chinese).
- [8] OH G. Effective stress and fatigue life prediction with mean stress correction models on a ferritic stainless steel sheet[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 157: 106707.
- [9] HAN L, HUANG D W, YAN X J, et al. Combined high and low cycle fatigue life prediction model based on damage mechanics and its application in determining the aluminized location of turbine blade[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 127: 120-130.
- [10] ZHANG Y K, GUO S X. Research on the fatigue performance of TC6 compressor blade under the CCF effect[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2018: 1-10.
- [11] 段 恒,刘庞轮,蒋炳炎,等. 不同结构表面状态下应变-寿命曲线的修正方法[J]. 机械强度, 2022, 44(6): 1455-1460.
DUAN Heng, LIU PangLun, JIANG BingYan, et al. Modification method of strain-life curves under different surface conditions of components[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(6): 1455-1460 (In Chinese).
- [12] 章 的,钱正明,米 栋,等. 某航空发动机燃气涡轮叶片低循环疲劳寿命研究[J]. 机械强度, 2022, 44(4): 1013-1016.
ZHANG Di, QIAN ZhengMing, MI Dong, et al. Research on low cycle fatigue life of gas turbine blade of an aero-engine[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(4): 1013-1016 (In Chinese).
- [13] 赵振华,陈 伟. 高低周复合载荷对 TC11 钛合金疲劳性能的影响[J]. 航空动力学报, 2011, 26(11): 2468-2474.
ZHAO ZhenHua, CHEN Wei. Effect of combined cycle load upon the fatigue performance of titanium alloy TC11[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(11): 2468-2474 (In Chinese).
- [14] 赵振华,陈 伟,吴铁鹰. 高低周复合载荷下的钛合金疲劳寿命估算[J]. 机械强度, 2011, 33(4): 629-632.
ZHAO ZhenHua, CHEN Wei, WU TieYing. Fatigue life predictions under high and low combined cycle loading[J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(4): 629-632 (In Chinese).
- [15] MINER M A. Cumulative damage in fatigue[J]. Journal of Applied Mechanics, 1945, 12(3): 159-164.
- [16] MANSON S S, HALFORD G R. Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage[J]. International Journal of Fracture, 1981, 17(2): 169-192.
- [17] TRUFYAKOV V I, KOVAL'CHUK V S. Determination of life under two-frequency loading. Report No. 2. Proposed method[J]. Strength of Materials, 1982, 14(10): 1303-1308.
- [18] 张大川,王英玉. LY¹²CZ 铝合金拉扭复合载荷下疲劳损伤律实验研究[J]. 机械强度, 2012, 34(5): 772-776.
ZHANG DaChuan, WANG YingYu. Experimental investigation on fatigue damage rule of LY¹²CZ aluminum alloy under tension-torsion loading[J]. Journal of Mechanical Strength, 2012, 34(5): 772-776 (In Chinese).
- [19] ZHAO Z H, LU K N, WANG L F, et al. Prediction of combined cycle fatigue life of TC11 alloy based on modified nonlinear cumulative damage model[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(7): 73-84.
- [20] ZHU S P, YUE P, YU Z Y, et al. A combined high and low cycle fatigue model for life prediction of turbine blades[J]. Materials, 2017, 10(7): E698.
- [21] 幸 杰,韩永典,徐连勇,等. 基于连续损伤力学的高低周复合疲劳损伤[J]. 焊接学报, 2017, 38(7): 63-66.
XING Jie, HAN YongDian, XU LianYong, et al. High cycle and low cycle hybrid fatigue damage based on continuum damage mechanics[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(7): 63-66 (In Chinese).
- [22] 李洪松,刘永葆,贺 星,等. 考虑耦合损伤的燃气轮机叶片材料高低周复合疲劳寿命研究[J]. 推进技术, 2022, 43(2): 7-13.
LI HongSong, LIU YongBao, HE Xing, et al. Combined high and low cycle fatigue life of gas turbine blade materials considering coupling damage[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(2): 7-13 (In Chinese).
- [23] BAI S, HUANG H Z, LI Y F, et al. A modified damage accumulation model for life prediction of aero-engine materials under combined high and low cycle fatigue loading[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2021, 44(11): 3121-3134.
- [24] 由 于,张 伟,王春生. 叶片高低周复合疲劳试验技术研究[J]. 机械强度, 2020, 42(2): 331-336.

- YOU Yu, ZHANG Wei, WANG ChunSheng. Research of HCF/LCF combined cycle fatigue experimental technique for blade[J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(2): 331-336 (In Chinese).
- [25] ZHENG X, ENGLER-PINTO C C, SU X, et al. Modeling of fatigue damage under superimposed high-cycle and low-cycle fatigue loading for a cast aluminum alloy[J]. Materials Science & Engineering: A, 2013, 560: 792-801.
- [26] 王时越, 邵剑飞. 金属材料低周与高低周复合疲劳性能的对比[C]. 材料与结构之力学测试国际学术会议, 1998: 101-104.
- WANG ShiYue, SHAO JianFei. Contrast between low cycle fatigue and high-low cycle complex fatigue behavior of metal materials[C]. International Conference on Mechanical Testing of Materials and Structures, 1998: 101-104 (In Chinese).
- [27] 李 睿, 鲍 蕊, 费斌军. 2024-T3 铝合金孔板高低周复合疲劳试验研究[J]. 飞机设计, 2010, 30(3): 18-22.
- LI Rui, BAO Rui, FEI BinJun. Experimental investigation on combined high and low cycle fatigue performance of 2024-T3 aluminum alloy plate with hole[J]. Aircraft Design, 2010, 30(3): 18-22 (In Chinese).
- [28] ZHU S P, LEI Q, WANG Q Y. Mean stress and ratcheting corrections in fatigue life prediction of metals [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2017, 40(9): 1343-1354.
- [29] LI K S, WANG J, FAN Z C, et al. A life prediction method and damage assessment for creep-fatigue combined with high-low cyclic loading[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 161: 106923.