

一种阶梯块谱下的疲劳累积损伤模型*

A MODEL OF FATIGUE CUMULATIVE DAMAGE UNDER STEP BLOCKS SPECTRUM

张 禄^{**1,2} 刘宏利^{1,2} 任春晓^{***1,2}

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

(2. 运输车辆运行安全技术交通运输行业重点实验室, 北京 100088)

ZHANG Lu^{1,2} LIU HongLi^{1,2} REN ChunXiao^{1,2}

(1. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

(2. Key Laboratory of Operation Safety Technology on Transport Vehicles, Beijing 100088, China)

摘要 针对阶梯块谱下的材料疲劳寿命预测问题,尤其是已有相关非线性模型的计算参数依赖大量试验数据或较难选取合适的基准值,导致在实际工程中应用有一定局限性。提出了一种新的基于相邻载荷的作用系数 $\alpha_i = (S_{i+1}/S_i)^{\frac{1}{b \lg K}}$,该系数中两个参数 b, K 来自材料疲劳寿命关系式 $S = KN^{-b}$ 。结合前人的二级、三级、四级应力加载试验结果,分别计算并对比了与多种疲劳损伤模型的结果。结果表明,新模型在疲劳寿命/损伤的预测结果优于 Miner 模型、Manson 模型、Subramanyan 模型及 Hashin 模型,可更为准确地预测阶梯块谱下的疲劳寿命/损伤。

关键词 阶梯块谱 疲劳损伤 疲劳寿命 多级应力 作用系数

中图分类号 TH142.2

Abstract In view of the materials fatigue life prediction problem under step blocks spectrum, especially the calculation parameters of the existing nonlinear models depend on a large number of test data or it is difficult to select a suitable reference value, which leads to the limitation in practical engineering application. A new effect coefficient $\alpha_i = (S_{i+1}/S_i)^{\frac{1}{b \lg K}}$ based on adjacent load was proposed, in which the two parameters b, K were derived from the fatigue life relation $S = KN^{-b}$. The fatigue damage models and the results which combined with the previous experimental results of two-, three- and four-stage loading were calculated and compared. The results show that the new model has better fatigue life/damage predicted results than Miner model, Manson model, Subramanyan model and Hashin model, which can be predicted more accurately in fatigue life/damage under step blocks spectrum.

Key words Step blocks spectrum; Fatigue damage; Fatigue life; Multi-stage stress; Effect coefficient

Corresponding author: REN ChunXiao, E-mail: cx.ren@rioh.cn.

The project supported by the Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund of China (No.2022-9027).

Manuscript received 20230802, in revised form 20230823.

0 引言

因交变载荷作用产生的疲劳破坏是工程机械部件最为主要的失效方式之一,占失效的80%~90%^[1]。目前疲劳寿命预估方法主要有两类:一类是基于循环计数法^[2-4],该方法主要是基于金属材料的应力的时间历程,通过一定计数方法,来当量换算疲劳损伤;另一种是谱分析法^[5-7],主要以载荷作用频率特性呈现。

在计数法的疲劳预测方面,MINER M A 最早提出

了能够解释疲劳破坏机制的累积损伤准则,因仅需交变载荷大小及其所对应的疲劳寿命且无须依赖其他参数的简便性,目前依旧广泛应用于工程中^[8]。不少试验指出,当疲劳载荷的作用次序发生变化时,Miner 准则预测的疲劳累积损伤将存在较大误差^[9]。MANSON S S 等^[10]提出分段线性疲劳累积模型,该模型将疲劳过程划分为裂纹形成阶段和裂纹扩展阶段两个阶段;MARCO S M 等^[11]最早提出非线性累积损伤理论,而后 MANSON S S^[10]与 SABRAMANYA S^[12]等分

*20230802收到初稿,20230823收到修改稿。中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2022-9027)资助。

**张 禄,男,1987年生,福建福州人,汉族,交通运输部公路科学研究院副研究员,博士,主要研究方向为车辆可靠性及数据应用。

***任春晓,男,1985年生,山东海阳人,汉族,交通运输部公路科学研究院副研究员,硕士,主要研究方向为载运工具运用工程。

别进一步提出基于有效微观裂纹增长与基于材料 $S-N$ 特性的固定拐点的非线性疲劳累积损伤模型,此外 HASHIN Z 等^[13]¹⁴⁸⁻¹⁵⁰也提出了考虑 $S-N$ 曲线中一个拐点的幂律法则来预测剩余损伤,该方法需要设定疲劳极限对应的疲劳寿命;MESMACQUE G 等^[14]²⁻³定义了损伤应力,提出了一种新的多级加载时按顺序规律的损伤指标,模型计算需要材料的极限应力。基于上述相关模型可知,相关的拐点、疲劳极限对应的疲劳寿命等均需进行一定量的试验,在实际工程中应用可能无法获取足够的疲劳加载数据。为此,提出一种仅仅需要依赖材料应力与疲劳寿命关系式来确定相关系数的新方法,并结合前人的二级至四级应力的疲劳试验结果,与现有的 Miner 模型、Manson 模型、Subramanyan 模型及 Hashin 模型进行对比。

1 疲劳累积损伤模型

1.1 Miner 模型

疲劳是材料在受到交变载荷作用下损伤逐渐累积的过程,每次载荷循环都将产生一定的损伤。Miner 最早提出了疲劳累积损伤准则,因其应用的简便性,已在工程中广泛应用。Miner 疲劳累积损伤计算式为

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

式中, D 为疲劳累积损伤变量; n_i 为交变应力 S_i 作用的循环数; N_i 为交变应力 S_i 作用下的疲劳寿命。

Miner 准则认为当累积损伤 $D = 1$ 时,即为失效。

1.2 非线性模型

大量疲劳试验指出,载荷次序对损伤的影响的特点为高低顺序排列的循环载荷作用下,发生疲劳破坏时的累积损伤 $\sum n_i/N_i < 1$; 低高顺序排列的循环载荷作用下,发生疲劳破坏时的累积损伤 $\sum n_i/N_i > 1$ 。也就意味着,高低顺序加载时,削弱了较低载荷的作用;低高顺序加载时,强化了较高载荷的作用。

为此,为考虑加载次序对疲劳累积损伤的影响, MARCO S M 等^[11]⁶²⁷⁻⁶³²等学者提出非线性疲劳累积损伤模型:

$$D = \frac{n_m}{N_m} + \left\{ \frac{n_{m-1}}{N_{m-1}} + \left[\frac{n_{m-2}}{N_{m-2}} + \cdots + \left[\frac{n_2}{N_2} + \left(\frac{n_1}{N_1} \right)^{\alpha_1} \right]^{\alpha_2} \cdots \right]^{\alpha_{m-2}} \right\}^{\alpha_{m-1}} \quad (2)$$

式中, $\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_m$ 为作用系数; m 为加载应力的级数。

MANSON S S 等^[10]¹⁶⁹⁻¹⁹²基于大量试验数据确定作用系数为

$$\alpha_i = \left(\frac{N_i}{N_{i+1}} \right)^{0.4} \quad (3)$$

SUBRAMANYAN S^[12]³¹⁶⁻³²¹根据基准应力幅值 S_{ref}

(一般取 S_{i+1}) 和疲劳极限 S_e , 给出的作用系数为

$$\alpha_i = \frac{(S_i - S_e)}{(S_{ref} - S_e)} \quad (4)$$

HASHIN Z 等^[13]¹⁴⁷⁻¹⁶⁰用疲劳极限 S_e 时的疲劳寿命 N_e , 基准应力幅值 S_{ref} 对应疲劳寿命 N_{ref} (一般取 N_{i+1}), 也作出了不同的表述, 对应的作用系数为

$$\alpha_i = \frac{\lg(N_i/N_e)}{\lg(N_{ref}/N_e)} \quad (5)$$

2 新的作用系数

非线性模型在多级应力加载中能得到较好应用, Manson 模型是根据大量试验数据确定出来响应的系数 0.4, 默认该系数均恒定不变, 无相关物理量与其关联; Subramanyan 模型和 Hashin 模型虽与相关材料的疲劳极限及其对应疲劳寿命有关联, 但在实际工程应用中, 疲劳极限的获取往往需要较大的试验时间和成本。

为此, 一方面考虑相邻载荷作用的相互关系, 参考 Manson、Subramanyan 及 Hashin 模型, 引入相邻载荷的比值作为其中一项指标; 另一方面将材料疲劳寿命关系式 $S = KN^{-b}$ 中两个参数 b, K 应用。提出一种新的基于相邻载荷相互作用的系数为

$$\lambda = \frac{1}{b \lg K} \quad (6)$$

该系数参考了胡明敏等^[15]⁶⁰⁻⁶¹提出的一种由 $S-N$ 曲线的平动加绕后继加载点的转动构成的寿命分析模型, 在表达了两级应力之间加载时, 剩余寿命计算公式包含了材料双对数的 $S-N$ 曲线斜率有关, 该剩余寿命计算式为

$$N_{r2} = 10^{\frac{\lg(R_{max}) - \lg S_2}{-K_1}} \quad (7)$$

式中, K_1 为材料双对数的 $S-N$ 曲线斜率 (为本文所提及的参数 $-b$); R_{max} 为材料的剩余强度。

因此, 一方面, 可知式 (7) 中 $\frac{1}{-K_1}$ 即为本文的参数 $\frac{1}{b}$; 另一方面, 双对数 $S-N$ 曲线在纵坐标上的截距为 K , 该数值因采用 $S = KN^{-b}$ 拟合会导致在低周寿命段与实际有较大偏差。因此, 在综合考虑 K 的数量级基础上先对其进行对数处理, 然后结合上述两方面考虑, 即为式 (6) 系数提出的整体思路。

基于该系数确定了新模型的作用系数为

$$\alpha_i = \left(\frac{S_{i+1}}{S_i} \right)^\lambda \quad (8)$$

因此, 该作用系数对疲劳试验数据依赖性低, 只需要对任意 2 个及以上应力的疲劳试验数据, 采用 $S = KN^{-b}$ 取对数后关系式 $\lg S = \lg K - b \lg N$ 并回归可获得 b, K 后, 即可进一步确定新模型的作用系数。

3 阶梯块谱的算例分析

3.1 两级应力加载

选取了 300CVM 钢^[16]、16Mn 钢^[17]及 30CrMnSiA 钢^[18]共 3 种材料的疲劳试验数据,每种材料应力均包含了高至低顺序加载和低至高顺序加载,各种材料 S-N 相关系数如表 1 所示,不同应力幅值下的疲劳寿命如表 2~表 4 所示。

表 1 3 种材料 S-N 特性的系数

Tab. 1 Coefficient for S-N characteristics of three materials			
材料 Material	300CVM 钢 300CVM steel	16Mn 钢 16Mn steel	30CrMnSiA 钢 30CrMnSiA steel
K	6 155	890	1 366
b	0.159 3	0.072 2	0.095 4

基于 300CVM 钢、16Mn 钢、30CrMnSiA 钢的两级应力加载试验结果,分别运用 Miner 模型、Manson 模型、Subramanyan 模型、Hashin 模型及新模型计算了疲劳损伤的预测结果,并进一步计算了疲劳损伤的相对误差及其平均值和最大值,试验结果与各种模型的预测结果的汇总如表 5~表 7 所示。通过 5 种模型预测结果的对比可知,新模型的疲劳损伤相对误差平均值和最大值均优于 Miner 模型、Manson 模型、Subramanyan 模型、Hashin 模型,尤其是 300CVM 钢,除了新模型之外,其余 4 种模型的相对误差最大值均超过了 50%。

其中, $E_r = \left| \frac{\text{试验的疲劳损伤} - \text{预测的疲劳损伤}}{\text{试验疲劳累积损伤}} \right| \times 100\%$ 。

表 2 不同应力幅值下的疲劳寿命(300CVM 钢)

Tab. 2 Fatigue life under different stress amplitudes (300CVM steel)							
应力幅值 Stress amplitude /MPa	2 086	2 000	1 655	1 103	965	900	827
疲劳寿命 Fatigue life	891	1 160	3 809	48 645	112 573	174 400	296 594

表 3 不同应力幅值下的疲劳寿命(16Mn 钢)

Tab. 3 Fatigue life under different stress amplitudes(16Mn steel)				
应力幅值 Stress amplitude /MPa	394	366	345	324
疲劳寿命 Fatigue life	93 500	199 700	402 200	1 370 200

表 4 不同应力幅值下的疲劳寿命(30CrMnSiA 钢)

Tab. 4 Fatigue life under different stress amplitudes(30CrMnSiA steel)		
应力幅值 Stress amplitude /MPa	482(最大应力 732,基准应力 250) (Maximum stress 732,basis stress 250)	586(最大应力 836,基准应力 250) (Maximum stress 836,basis stress 250)
疲劳寿命 Fatigue life	55 757	7 186

表 5 两级载荷下试验结果与各种模型的预测结果对比(300CVM 钢)

Tab. 5 Comparison of experimental results and model-predicted results under two-stage loading (300CVM steel)												
应力幅值 Stress amplitude /MPa	试验结果 Experimental result		Miner 模型 Miner model		Manson 模型 Manson model		Subramanyan 模型 Subramanyan model		Hashin 模型 Hashin model		新模型 New model	
	d_1	d_2	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$
1 655~2 000	0.196	0.806	0.804	0.20	0.927	12.11	0.890	8.38	0.862	5.55	0.892	8.63
	0.396	0.727	0.604	10.95	0.775	4.25	0.715	1.09	0.675	4.63	0.719	0.76
	0.586	0.493	0.414	7.32	0.577	7.77	0.515	2.05	0.477	1.47	0.519	2.39
	0.786	0.226	0.214	1.19	0.321	9.41	0.278	5.17	0.253	2.71	0.281	5.41
1 103~2 000	0.130	1.008	0.870	12.13	1.000	0.71	0.998	0.85	0.990	1.62	0.996	1.07
	0.267	0.816	0.733	7.66	0.997	16.73	0.984	15.51	0.948	12.17	0.971	14.31
	0.533	0.898	0.467	30.12	0.939	2.90	0.860	2.64	0.755	9.99	0.815	5.81
827~2 000	0.196	0.796	0.804	0.81	1.000	20.56	1.000	20.56	1.000	20.55	0.999	20.48
	0.241	0.830	0.759	6.63	1.000	15.87	1.000	15.87	1.000	15.84	0.998	15.67
	0.401	0.764	0.599	14.16	1.000	20.24	1.000	20.24	0.994	19.72	0.981	18.60
	0.812	0.847	0.188	39.72	0.852	0.32	0.848	0.08	0.686	9.71	0.593	15.30

续表

应力幅值 Stress amplitude /MPa	试验结果 Experimental result		Miner 模型 Miner model		Manson 模型 Manson model		Subramanyan 模型 Subramanyan model		Hashin 模型 Hashin model		新模型 New model	
	d_1	d_2	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$
900~2 086	0.169	0.85	0.831	1.86	1.000	14.72	1.000	14.72	0.999	14.62	0.999	14.60
	0.339	0.889	0.661	18.57	1.000	9.01	0.999	8.92	0.985	7.80	0.983	7.64
	0.508	0.874	0.492	27.64	0.993	8.64	0.983	7.90	0.927	3.86	0.921	3.43
	0.678	0.794	0.322	32.07	0.944	10.21	0.904	7.48	0.778	1.10	0.768	1.80
965~1 655	0.241	0.776	0.759	1.67	0.996	21.63	0.992	21.28	0.973	19.42	0.969	18.99
	0.419	0.857	0.581	21.63	0.966	8.51	0.950	7.25	0.891	2.68	0.881	1.86
	0.839	0.776	0.161	38.08	0.493	17.49	0.453	20.02	0.361	25.70	0.349	26.45
2 000~1 655	0.160	0.696	0.840	16.82	0.680	1.89	0.742	5.32	0.779	9.71	0.738	4.90
	0.312	0.508	0.688	21.95	0.515	0.87	0.577	8.39	0.617	13.30	0.573	7.94
	0.482	0.375	0.518	16.69	0.365	1.21	0.417	4.85	0.452	8.98	0.413	4.47
	0.642	0.258	0.358	11.11	0.241	1.92	0.279	2.34	0.306	5.33	0.277	2.07
	0.794	0.250	0.206	4.21	0.134	11.15	0.157	8.95	0.173	7.36	0.155	9.09
2 000~1 103	0.151	0.580	0.849	36.80	0.346	32.05	0.454	17.29	0.571	1.28	0.506	10.12
	0.160	0.383	0.840	84.16	0.337	8.45	0.443	11.12	0.559	32.49	0.495	20.68
	0.320	0.383	0.680	42.25	0.226	22.39	0.305	11.05	0.399	2.32	0.346	5.22
	0.508	0.214	0.492	38.50	0.141	10.11	0.195	2.67	0.261	6.56	0.223	1.29
	0.633	0.196	0.367	20.63	0.098	11.88	0.136	7.24	0.185	1.33	0.157	4.72
	0.794	0.071	0.206	15.61	0.050	2.38	0.071	0.01	0.098	3.12	0.082	1.33
2 000~724	0.071	0.723	0.929	25.94	0.186	67.59	0.082	80.75	0.138	73.64	0.388	42.17
	0.160	0.187	0.840	188.18	0.133	15.52	0.057	37.34	0.098	25.65	0.289	29.25
	0.348	0.089	0.652	128.83	0.079	2.29	0.034	12.70	0.058	7.17	0.178	20.37
	0.464	0.080	0.536	83.82	0.058	4.02	0.024	10.20	0.042	6.93	0.133	9.73
	0.625	0.026	0.375	53.61	0.036	1.53	0.015	1.68	0.026	0.02	0.084	8.85
2 000~1 379	0.071	0.803	0.929	14.42	0.647	17.91	0.753	5.69	0.823	2.29	0.760	4.88
	0.160	0.741	0.840	10.99	0.513	25.25	0.621	13.35	0.699	4.69	0.628	12.50
	0.294	0.455	0.706	33.51	0.382	9.75	0.477	2.90	0.551	12.86	0.484	3.84
	0.482	0.366	0.518	17.92	0.249	13.75	0.320	5.39	0.380	1.63	0.326	4.74
	0.642	0.294	0.358	6.84	0.160	14.33	0.209	9.08	0.252	4.50	0.213	8.67
	0.785	0.250	0.215	3.38	0.091	15.38	0.120	12.54	0.147	9.99	0.123	12.31
2 000~827	0.160	0.517	0.840	47.71	0.181	49.65	0.183	49.31	0.281	34.90	0.346	25.29
	0.160	0.482	0.840	55.76	0.181	46.90	0.183	46.55	0.281	31.35	0.346	21.22
	0.320	0.258	0.680	73.01	0.117	24.45	0.118	24.19	0.185	12.59	0.232	4.52
	0.473	0.142	0.527	62.60	0.078	10.36	0.079	10.19	0.126	2.61	0.159	2.79
	0.642	0.089	0.358	36.80	0.047	5.73	0.048	5.64	0.077	1.70	0.098	1.17
	0.803	0.062	0.197	15.61	0.024	4.44	0.024	4.40	0.039	2.70	0.050	1.44
相对误差平均值 Average value of relative error /%			31.31		13.79		12.85		11.00		10.19	
相对误差最大值 Maximum value of relative error /%			188.18		67.59		80.75		73.64		42.17	

表 6 两级载荷下试验结果与各种模型的预测结果对比 (16Mn 钢)

Tab. 6 Comparison of experimental results and model-predicted results under two-stage loading (16Mn steel)

应力幅值 Stress amplitude /MPa	试验结果 Experimental result		Miner 模型 Miner model		Manson 模型 Manson model		Subramanyan 模型 Subramanyan model		Hashin 模型 Hashin model		新模型 New model	
	d_1	d_2	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$
394~345	0.100	0.670	0.900	29.87	0.723	6.91	0.698	3.58	0.767	12.65	0.709	5.07
	0.200	0.587	0.800	27.06	0.593	0.71	0.567	2.60	0.639	6.63	0.578	1.13
	0.400	0.521	0.600	8.58	0.400	13.11	0.379	15.45	0.440	8.76	0.388	14.42
	0.500	0.396	0.500	11.61	0.321	8.40	0.302	10.45	0.355	4.54	0.310	9.55
	0.600	0.184	0.400	27.55	0.248	8.16	0.233	6.26	0.276	11.79	0.240	7.09

续表

应力幅值 Stress amplitude /MPa	试验结果 Experimental result		Miner模型 Miner model		Manson模型 Manson model		Subramanyan模型 Subramanyan model		Hashin模型 Hashin model		新模型 New model	
	d_1	d_2	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$
345~394	0.180	1.020	0.820	16.67	0.954	5.52	0.963	4.74	0.933	7.23	0.959	5.07
	0.360	1.020	0.640	27.54	0.840	13.06	0.860	11.59	0.801	15.89	0.851	12.23
	0.450	0.880	0.550	24.81	0.761	8.95	0.785	7.14	0.717	12.29	0.774	7.93
	0.490	0.820	0.510	23.66	0.722	7.51	0.747	5.59	0.676	11.01	0.736	6.44
	0.580	0.780	0.420	26.47	0.623	11.52	0.650	9.59	0.577	14.94	0.638	10.44
366~324	0.200	0.720	0.800	8.70	0.525	21.17	0.501	23.79	0.476	26.48	0.597	13.39
	0.400	0.400	0.600	25.00	0.346	6.79	0.327	9.13	0.308	11.49	0.404	0.47
	0.550	0.280	0.450	20.48	0.242	4.61	0.228	6.31	0.214	8.00	0.286	0.77
	0.700	0.220	0.300	8.70	0.152	7.37	0.143	8.39	0.134	9.39	0.182	4.10
	0.800	0.150	0.200	5.26	0.098	5.46	0.092	6.11	0.086	6.76	0.118	3.33
323~366	0.100	1.200	0.900	23.08	0.993	15.92	0.995	15.76	0.997	15.63	0.983	16.69
	0.200	1.000	0.800	16.67	0.969	2.57	0.976	2.01	0.982	1.52	0.942	4.81
	0.400	1.020	0.600	29.58	0.862	11.13	0.880	9.86	0.898	8.61	0.803	15.29
	0.500	0.960	0.500	31.51	0.776	12.58	0.799	11.03	0.822	9.47	0.707	17.32
相对误差平均值 Average value of relative error /%			20.67		9.02		8.91		10.69		8.19	
相对误差最大值 Maximum value of relative error /%			31.51		21.17		23.79		26.48		17.32	

表 7 两级载荷下试验结果与各种模型的预测结果对比(30CrMnSiA 材料)

Tab. 7 Comparison of experimental results and model-predicted results under two-stage loading (30CrMnSiA material)

应力幅值 Stress amplitude /MPa	试验结果 Experimental result		Miner模型 Miner model		Manson模型 Manson model		Subramanyan模型 Subramanyan model		Hashin模型 Hashin model		新模型 New model	
	d_1	d_2	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$	d_2	$E_f/\%$
586~482	0.167	0.662	0.833	20.63	0.546	14.05	0.611	6.177	0.649	1.58	0.606	6.77
	0.208	0.582	0.792	26.58	0.499	10.46	0.563	2.401	0.601	2.38	0.558	3.01
	0.417	0.287	0.583	42.05	0.320	4.66	0.369	11.712	0.400	16.12	0.366	11.16
	0.694	0.125	0.306	22.10	0.149	2.89	0.175	6.127	0.192	8.23	0.173	5.87
482~586	0.223	0.917	0.777	12.28	0.967	4.37	0.942	2.187	0.923	0.54	0.944	2.38
	0.269	0.903	0.731	14.68	0.949	3.94	0.917	1.205	0.894	0.76	0.920	1.44
	0.448	0.750	0.552	16.53	0.838	7.37	0.782	2.665	0.747	0.28	0.786	3.03
	0.628	0.615	0.372	19.55	0.652	2.98	0.586	2.318	0.549	5.34	0.591	1.93
	0.807	0.425	0.193	18.83	0.385	3.22	0.334	7.374	0.307	9.58	0.338	7.08
相对误差平均值 Average value of relative error /%			21.47		5.99		4.68		4.98		4.74	
相对误差最大值 Maximum value of relative error /%			42.05		14.05		11.71		16.12		11.16	

3.2 三级应力加载

对 LY12CZ 材料进行疲劳试验^{[15]62},在不同载荷作用下其寿命如表 8 所示,抗拉强度为 608.25 MPa。三级加载顺序分别有低高加载、低高低加载、高低加载、高低高加载,S-N 曲线的系数 $K =$

$1\ 023, b = 0.112$,得到 5 种模型的预测值与试验结果的对比如表 9 所示,Subramanyan 模型、Hashin 模型及新模型的相对误差平均值和最大值均较为接近,Miner 模型的相对误差平均值和最大值均最大。

表 8 不同应力幅值下的疲劳寿命(LY12CZ 材料)

Tab. 8 Fatigue life under different stress amplitudes(LY12CZ material)

应力幅值 Stress amplitude /MPa	$S_1=224.20$	$S_2=246.49$	$S_3=359.87$	$S_4=503.18$
疲劳寿命 Fatigue life	719 424	312 500	12 098	524

表 9 三级加载下的预测值和试验结果

Tab. 9 Comparison of experimental results and model-predicted results under three-stage loading

应力顺序 Stress sequence	试验结果 Experimental result			Miner 模型 Miner model		Manson 模型 Manson model		Subramanyan 模型 Subramanyan model		Hashin 模型 Hashin model		新模型 New model	
	d_1	d_2	d_3	d_3	$E_f/\%$	d_3	$E_f/\%$	d_3	$E_f/\%$	d_3	$E_f/\%$	d_3	$E_f/\%$
S_1, S_3, S_4	0.556	0.248	0.646	0.196	13.52	0.986	23.44	0.939	20.18	0.908	18.05	0.945	20.63
S_1, S_4, S_3	0.556	0.191	0.517	0.253	20.02	0.376	11.16	0.563	3.62	0.620	8.15	0.457	4.73
S_4, S_3, S_2	0.191	0.248	0.159	0.561	93.81	0.037	20.47	0.076	13.95	0.115	7.30	0.074	14.15
S_4, S_2, S_3	0.287	0.064	0.334	0.649	94.74	0.100	34.15	0.248	12.51	0.360	3.77	0.216	17.25
相对误差平均值 Average value of relative error /%				55.52		22.30		12.56		9.32		14.19	
相对误差最大值 Maximum value of relative error /%				94.74		34.15		20.18		18.05		20.63	

3.3 四级应力加载

选用了 MESMACQUE G 等^{[14]1-7}中铝合金材料的四级应力加载试验数据。不同应力的疲劳寿命和每级施加的循环次数如表 10 所示,加载顺序如图 1 所示。拟合得到 $S-N$ 曲线的系数 $K = 855, b = 0.0873$ 。载荷的加载顺序如图 2 所示。对 Miner、Manson、Subramanyan、Hashin 及新模型的累积疲劳寿命和损伤进行预测,结果如表 11 所示,并与试验结果进行对比,5 种模型的相对误差最大值分别为 26.58%、8.57%、34.17%、32.95%及6.91%,其中,Subramanyan 与 Hashin 模型在载

荷 B 组中预测的疲劳累积损伤超过了 1.5,疲劳损伤/寿命的预测误差较大。

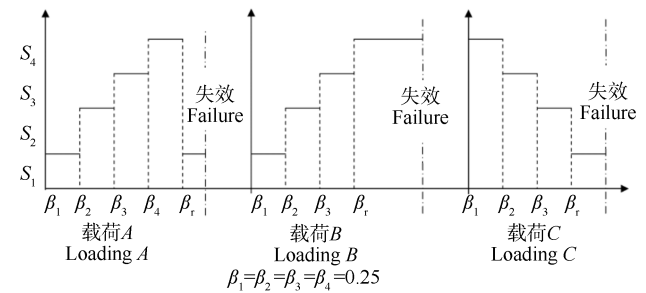


图 1 载荷 A、B 及 C 的加载顺序

Fig. 1 Loading sequence of loading A, B and C

表 10 不同应力幅值的疲劳寿命和每级施加的循环次数

Tab. 10 Applied cycles and fatigue cycles under different stress amplitudes

应力幅值 Stress amplitude /MPa	$S_1=260$	$S_2=275$	$S_3=290$	$S_4=305$
每级加载次数 Number of life cycles for each stress	210 000	110 500	60 000	33 750
疲劳寿命 Fatigue life	840 000	442 000	240 000	135 000

表 11 四级加载预测值和试验值对比

Tab. 11 Comparison of experimental results and model-predicted results under four-stage loading

	载荷 A: $S_1-S_2-S_3-S_4-S_1$ Load A: $S_1-S_2-S_3-S_4-S_1$			载荷 B: $S_1-S_2-S_3-S_4$ Load B: $S_1-S_2-S_3-S_4$			载荷 C: $S_4-S_3-S_2-S_1$ Load C: $S_4-S_3-S_2-S_1$		
	总寿命 Total life	累积疲劳损伤 Cumulative fatigue damage	$E_f/\%$	总寿命 Total life	累积疲劳损伤 Cumulative fatigue damage	$E_f/\%$	总寿命 Total life	累积疲劳损伤 Cumulative fatigue damage	$E_f/\%$
试验结果 Experimental result	531 000	1.139	—	434 500	1.151	—	236 500	0.790	—
Miner 模型 Miner model	414 250	1.000	12.20	414 250	1.000	13.12	414 250	1.000	26.58
Manson 模型 Manson model	522 670	1.129	0.87	447 940	1.250	8.57	266 780	0.824	4.36
Subramanyan 模型 Subramanyan model	465 610	1.061	6.84	487 720	1.544	34.17	200 030	0.745	5.70
Hashin 模型 Hashin model	467 740	1.064	6.61	485 840	1.530	32.95	202 040	0.747	5.40
新模型 New model	514 490	1.119	1.73	442 750	1.211	5.22	283 700	0.845	6.91

4 结果对比

4.1 疲劳累积寿命/损伤的对比

通过汇总二级~四级算例,得到试验疲劳累积损伤与各模型疲劳累积损伤的对比,如图2所示;试验累积寿命与各模型疲劳累积寿命的对比,如图3所示。

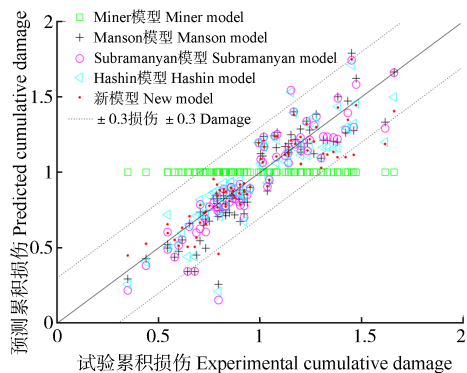


图2 各级应力加载下不同模型的疲劳累积损伤对比

Fig. 2 Comparison of cumulative damage of different models under each stage stress loading

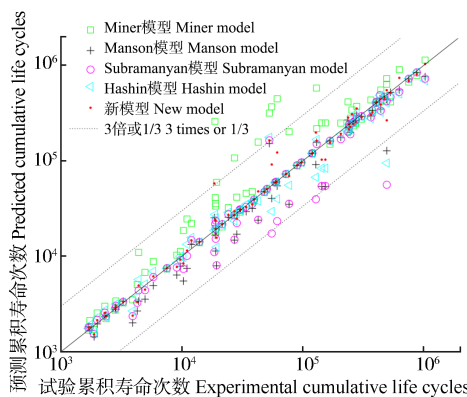


图3 各级应力加载下不同模型的疲劳累积寿命对比

Fig. 3 Comparison of cumulative life of different models under each stage stress loading

由图2可知,若以疲劳累积损伤的 ± 0.3 作为区间分界线,Miner模型预测有大量结果落在区间之外,其余4种模型多数落在区间之内,有个别结果落在区间之外,且4个模型中新模型的最远距离均低于其他3种模型。

由图3可知,若以疲劳累积寿命的3倍或1/3作为区间分界线,Miner模型预测有多个结果落在区间之外,新模型均落在该寿命区间之内,其余3种模型有个别落在区间外。

4.2 统计特征值对比

进一步计算了各模型试验疲劳累积损伤与预测疲劳累积损伤之差的统计值及分布图(图4)。其中,统计值包括最小值、最大值及标准差,如表12所示。由表12可知,新模型的3个统计指标均优于其他四个模型,Manson、Subramanyan及Hashin的3个模型统计值较为接近且均优于Miner模型。

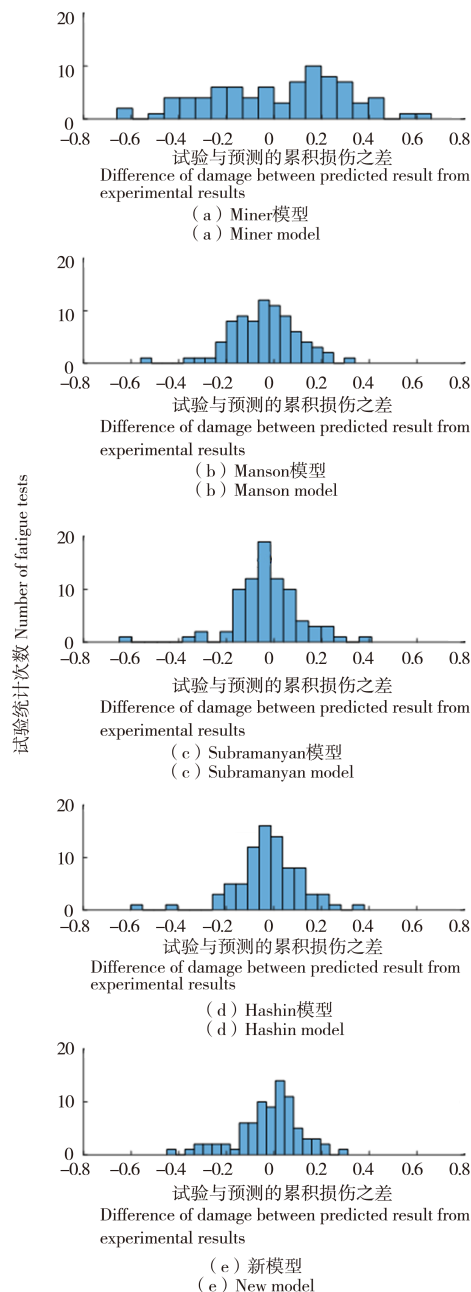


图4 各模型试验累积损伤与预测累积损伤之差的分布图

Fig. 4 Distribution diagram of the difference between experimental cumulative damage and predicted cumulative damage of each model

综上,通过与二级~四级应力加载试验结果的对比,新模型的疲劳寿命/损伤预测总体优于Miner、Manson、Subramanyan及Hashin模型,具有一定的工程应用价值。

5 结论

本文针对阶梯块谱下材料疲劳寿命预测时试验数据依赖性或不相关基准值不易获取等问题,通过借鉴现有的非线性模型提出了一种新的具有一定工程应用价值的疲劳损伤模型。得到主要结论如下:

1)提出了一种新的基于相邻载荷的作用系数 $\alpha_i = (S_{i+1}/S_i)^{\frac{1}{b \lg K}}$,该系数中两个参数 b 、 K 来自材料疲劳寿

表 12 各模型试验累积损伤与预测累积损伤之差的统计值

Tab. 12 Statistical value of the difference of cumulative damage for experiment and prediction of each model

	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	标准差 Standard deviation
Miner 模型 Miner model	-0.659	0.653	0.281
Manson 模型 Manson model	-0.537	0.340	0.140
Subramanyan 模型 Subramanyan model	-0.641	0.393	0.142
Hashin 模型 Hashin model	-0.585	0.379	0.140
新模型 New model	-0.427	0.299	0.119

命关系式 $S = KN^{-b}$, 与 Subramanyan 和 Hashin 模型的系数要求不同, 只需要对任意二级及以上应力的疲劳试验数据, 对疲劳试验数据依赖性低。

2) 将新模型用于前人已有的二级、三级、四级应力加载试验中预测, 并与 Miner、Manson、Subramanyan、Hashin 模型的预测结果进行了对比, 验证了该模型具有较高的疲劳寿命/损伤的预测精度。

3) 结合新模型的计算结果, 初步解释了非线性多级应力加载的作用系数与材料 $S-N$ 特性曲线的参数存在关联性。

4) 建议把新的参数引入用于修正作用系数, 以提出预测精度更高的疲劳损伤模型。

参考文献 (References)

- [1] 樊俊铃, 张 伟, 焦 婷, 等. 飞机结构螺栓连接细节疲劳断裂失效机制与寿命分析[J]. 机械强度, 2023, 45(6): 1459-1464.
FAN JunLing, ZHANG Wei, JIAO Ting, et al. Failure mechanism of fatigue fracture and life analysis for bolted joint of aircraft structure[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(6): 1459-1464(In Chinese).
- [2] 张宗阳, 谢双双, 王 凯, 等. 基于实测载荷的牵引车双腔油箱失效研究[J]. 机械强度, 2024, 46(1): 224-230.
ZHANG ZongYang, XIE ShuangShuang, WANG Kai, et al. Study on failure of tractor double-cavity fuel tank based on measured load[J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(1): 224-230(In Chinese).
- [3] 王朝华, 吴凤和, 刘加亮, 等. 考虑损伤累积的铝合金轮毂疲劳寿命预测及试验研究[J]. 机械强度, 2023, 45(4): 970-976.
WANG ZhaoHua, WU FengHe, LIU JiaLiang, et al. Fatigue life prediction and experimental study of aluminum alloy wheel hub considering damage accumulation [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(4): 970-976(In Chinese).
- [4] JEN Y M, YANG Y H. A study of two-stage cumulative fatigue behavior for CNT/epoxy composites [J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1): 2111-2120.
- [5] ADAMA N, MILAN R, JAN P, et al. Fatigue life prediction for broad-band multiaxial loading with various PSD curve shapes [J]. International Journal of Fatigue, 2012, 44: 74-88.
- [6] CRISTONFORI A, BENASCIUTTI D, TOVO R. A stress invariant based spectral method to estimate fatigue life under multiaxial random loading[J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33(7): 887-899.
- [7] BENASCIUTTI D, CRISTONFORI A, TOVO R. Analogies between spectral methods and multiaxial criteria in fatigue damage evaluation [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2013, 31: 39-45.
- [8] 胡玉侠, 王海杰, 刘新田. 基于低载强化的横向稳定杆随机疲劳寿命预估[J]. 机械强度, 2023, 45(5): 1221-1228.
HU YuXia, WANG HaiJie, LIU XinTian. Random fatigue life prediction of stabilizer bar based on low load strengthening [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(5): 1221-1228(In Chinese).
- [9] ANTONINO R, GIACOMO R. Cumulative damage evaluation in multiple cycle fatigue tests taking into account energy parameters [J]. International Journal of Fatigue, 2013, 48: 214-222.
- [10] 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.
- [11] MARCO S M, STARKEY W L. A concept of fatigue damage [J]. Journal of Fluids Engineering, 1954, 76(4): 627-632.
- [12] SABRAMANYAN 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.
- [13] HASHIN Z, ROTEM A. A cumulative damage theory of fatigue failure[J]. Materials Science Engineering, 1978, 34(2): 147-160.
- [14] MESMACQUE G, GARCIA S, AMROUCHE A, et al. Sequential law in multiaxial fatigue, a new damage indicator [J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(4): 461-467.
- [15] 胡明敏, 唐静静, 魏 平. 一种 $S-N$ 曲线移动法的寿命分析模型 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(1): 60-63.
HU MingMin, TANG JingJing, WEI Ping. $S-N$ curve movement-based life analytical model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003, 31(1): 60-63 (In Chinese).
- [16] MANSON S S, FRECHE J C, ENSIGN C R. Application of a double linear damage rule to cumulative fatigue [J]. ASTM Special Technical Publication, 1967, STP 415: 384-412.
- [17] 谢里阳, 吕文阁, 师照峰. 两级载荷作用下疲劳损伤状态的试验研究[J]. 机械强度, 1994, 16(3): 52-54.
XIE LiYang, LÜ WenGe, SHI ZhaoFeng. Experimental study on fatigue damage under two level loading [J]. Journal of Mechanical Strength, 1994, 16(3): 52-54(In Chinese).
- [18] 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(In Chinese).