

疲劳损伤的非线性累积模型及其应用*

谢 敏 张安哥 李启镓 李达仁

(工程力学研究室)

(南昌铁路科研所)

摘 要 通过定义单个载荷循环所造成的疲劳损伤量,给出了一个适合于对疲劳过程进行模拟分析的非线性疲劳损伤累积模型.通过对多级载荷下的疲劳寿命分析结果与实验数据的比较,证明该损伤模型能够正确反映载荷次序效应等疲劳累积损伤规律.作为该模型的应用,本文采用计算机仿真方法进行了随机载荷作用下的起重机焊接箱形梁的疲劳寿命分析.

关键词 疲劳;损伤;寿命;模拟

分类号 O346.2

0 引 言

疲劳失效是工程结构的主要失效形式之一,如何度量疲劳累积损伤一直是人们非常关注的一个问题.描述材料累积损伤规律的疲劳损伤理论一般建立在疲劳试验和理论分析的基础上,是进行变幅载荷下疲劳寿命分析的关键问题.自从 Miner 线性累积损伤理论提出以来,相继出现了许多种疲劳累积损伤理论,特别是近年来人们在不可逆热力学框架下建立了一些内变量损伤理论^[1~3].作为描述材料受损状态的损伤变量,应该是既能反映材料的损伤机理,又对损伤过程比较敏感,易于测量,并随循环加载过程的进行呈单调变化趋势的状态量.然而,由于目前尚不确切地知道疲劳失效的机理,疲劳损伤量仍是一个抽象的概念,难于直接度量,因此,一般是采用比较度量法来描述疲劳损伤程度.常用的表征疲劳累积损伤的状态变量有:循环寿命比、剩余寿命(或强度)、循环塑性应变能、弹性模量、有效应力和裂纹长度等^[1~6].

本文以不可逆热力学和损伤力学的基本概念为基础,在充分利用已有试验数据和研究成果的前提下,通过定义单个载荷循环所造成的疲劳损伤量,提出了一个适合于对疲劳过程进行模拟分析的非线性疲劳损伤累积模型.通过对多级载荷下的疲劳寿命分析结果与实验数据的比较,证明该损伤模型能够正确反映载荷次序效应等疲劳累积损伤规律.作为该模型的工程应用,本文采用计算机仿真方法进行了随机载荷作用下的起重机焊接箱形梁的疲劳寿命分析,为工程结构的寿命估计提供了一种较实用的计算机模拟分析方法.

1 疲劳损伤的非线性累积模型

收稿日期:1995-06-10. 谢 敏,男,1964年生,副教授.

* 铁路高校青年教师基金资助项目

疲劳是材料在交变载荷作用下损伤逐渐累积的过程,每一次载荷循环都将产生一定的损伤量。采用循环续循环(cycle-by-cycle)的方法来进行损伤的累积计算,则第 i 个应力循环时的损伤量 D_i 可按式求得:

$$D_i = D_{(i-1)} + \Delta D_i, \quad (1)$$

当 D_i 达到某个临界值 D_c 时便发生疲劳破坏,此时的循环次数即为结构的疲劳寿命。

由于影响疲劳损伤的因素很多,仅就同一材料在同样的结构型式及环境条件的情况来说,疲劳损伤量主要与载荷和材料的特性有关。就载荷而言,主要的影响因素是应力循环的变程 S_r (或峰值 S_{max})和均值 S_m 。而描述结构材料特性的参数主要有材料的强度极限 S_b 和 $S-N$ 曲线等。另一方面,尽管在某些场合 Miner 线性累积损伤法则能给出比较令人满意的结果,但疲劳损伤的累积过程从本质上讲是一种非线性的不可逆过程,某一加载时刻的损伤量必然和当前的损伤状态有关,因此,疲劳损伤速率 dD/dN 可以表示为^[3]:

$$dD = f(S_r, S_m, C, m, S_b, D, \dots) dN, \quad (2)$$

函数 $f()$ 体现了疲劳损伤的演变规律。在充分利用已有实验数据和研究成果的前提下,本文将疲劳损伤演变法则表达成如下的幂函数形式:

$$\Delta D_i = \frac{dD}{dN} = \alpha \left(\frac{i}{i-1} \right)^{(\alpha-1)} D^{(1-1/\alpha)} \left(\frac{1}{N_f} \right), \quad (3)$$

其中损伤的初始值 $D_0 = 0$, 临界值 $D_c = 1$ 。在常幅载荷条件下,积分上式可得到类似于 Corten-Dolan 非线性累积损伤法则的损伤公式:

$$D = \left(\frac{n}{N_f} \right)^\alpha. \quad (4)$$

其中 α 为依赖于载荷水平的材料参数。文献[2]在进行应变控制条件的损伤分析时,将 $1/\alpha$ 与载荷之间的关系取为简单的线性关系。本文根据 Chaboche^[3]由有效应力概念及连续损伤力学方法进行损伤实验测定的结果,假定参数 α 可按式确定:

$$\alpha = C' (S_r/S_b)^q, \quad (5)$$

式中 C' 、 q 为材料常数,其值可由上述损伤实验结果确定。

2 多级载荷下的疲劳寿命分析

一个合理的损伤累积法则应当能够反映一些基本的实验规律。为了验证上面所提出的疲劳损伤演变法则(3)的非线性性质,本文对循环软化材料 16Mn 和循环硬化材料正火 45 钢进行了多级载荷下的疲劳寿命分析。

2.1 材料参数的确定

对于两级载荷情况,由式(4)可得一、二级载荷循环数之间的关系:

$$\frac{n_2}{N_{f2}} = 1 - \left(\frac{n_1}{N_{f1}} \right)^{\alpha_1/\alpha_2}, \quad (6)$$

另一方面,利用式(5)可得:

$$q = \lg \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) / \lg \left(\frac{S_{r1}}{S_{r2}} \right). \quad (7)$$

根据文献[5]、[7]中给出的材料参数和两级载荷的疲劳实验数据求得材料常数 q 为:对于 16Mn, $q = -6.241$; 对于正火 45 钢, $q = -4.847$ 。

2.2 高一低两级载荷疲劳寿命估算结果

根据上面确定的有关参数,以及式(3)给出的非线性疲劳损伤演变法则,本文采用 cycle-by-cycle 方法对高一低两级载荷下的疲劳寿命进行了估算(图 1). 由图可见,实验值与模型估算曲线非常接近,因而表明本文所提出的损伤模型具有令人满意的精度.

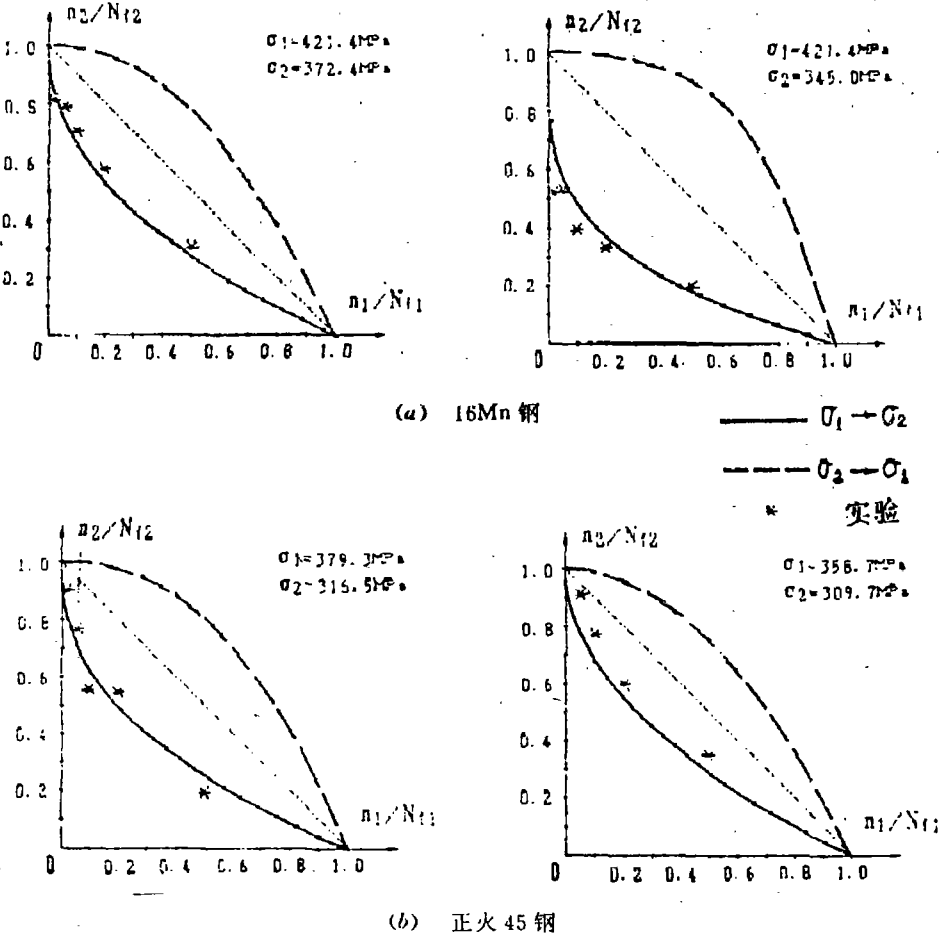


图 1 两级载荷疲劳寿命估算结果

2.3 加载次序效应

按同样的方法,本文对低一高二级载荷作用下的疲劳寿命也进行了估算,但因目前条件所限,尚无相应的实验数据,因此,低一高荷载情况下估算值的精确验证还有待今后进一步补充与完善. 在此,我们将其与高一低荷载时的寿命进行了对比分析(表 1),旨在验证损伤模

表 1 累积损伤值 $\sum n_i/N_i$ 的比较

材 料	加载方式	实 验 值		估 算 值	
		均 值	标准差	均 值	标准差
16Mn	高 → 低	0.727	0.113	0.744	0.099
	低 → 高	—	—	1.230	0.098
正火 45	高 → 低	0.830	0.121	0.806	0.076
	低 → 高	—	—	1.173	0.085

型的合理性.由表中数据可见:按高一低顺序加载时,累积损伤值 $\sum n_i/N_{fi} < 1$,并且循环硬化材料正火45钢的累积损伤值大于循环软化材料16Mn钢的累积损伤值;而按低—高顺序加载时,其规律正好相反, $\sum n_i/N_{fi} > 1$.这与近年来观察到的疲劳现象是一致的.此外,文献[3]给出的C35钢和4340钢的两级载荷疲劳实验结果表明,高一低加载情况与低—高加载情况下的寿命分数 $n_1/N_{f1} \sim n_2/N_{f2}$ 曲线呈对称性,而本文模型的估算情况与此相符(图1).上述分析表明本文所提出的非线性疲劳损伤累积模型能够正确地反映疲劳过程的加载次序效应.

3 起重机焊接箱形梁的随机疲劳寿命估算

3.1 起重机主梁的疲劳载荷谱

起重机箱形主梁是较为典型的焊接钢结构构件,其疲劳强度除了与构件的构造细节有关外,主要取决于主梁危险截面危险点的应力幅值、起重机设计规范^[8]根据载荷的动载情况和频繁程度,把起重机载荷按名义载荷谱系数 K_p 划分为四个等级(1,0.5,0.25和0.125).文献[9,10]采用电测法得到实测的主梁应力时间历程,经统计分析表明,主梁应力幅最大值服从正态分布.不同工作级别 K_p 桥式起重机实测应力幅谱列于表2.

表2 实测应力幅谱

K_p	μ'_T	σ'_T
1.0	0.98	0.06
0.5	0.70	0.10
0.25	0.53	0.12
0.125	0.38	0.14

表中: $\mu'_T = \mu_{TSr}/S_{rmax}$,

$$\sigma'_T = \sigma_{TSr}/S_{rmax},$$

$$S_{rmax} = \mu_{TSr} + 3\sigma_{TSr}.$$

上式中的 μ_{TSr} 、 σ_{TSr} 分别为设计寿命 T 时间内应力幅 S_r 正态分布的均值与标准差.

3.2 焊接箱形梁的疲劳特性

对于焊接箱形梁的疲劳强度,各国已做了大量的试验研究工作.在国内,北京起重运输机械研究所和太原重机学院等单位曾先后进行了桥式起重机箱形主梁的疲劳试验^[10,11].试件模拟现行通用桥式起重机系列产品中主梁的断面尺寸、连接形式与跨度等,采用Q235钢制成1:2的模型梁,将原型缩小一倍进行试验.文献[10]通过对试验结果的统计分析得到:在等幅载荷下,起重机主梁的疲劳寿命服从对数正态分布,焊接主梁 $P-S-N$ 曲线方程的一般形式为:

$$\lg N_f = 12.3688 + 0.2162u_p - 2.9704\lg S_r, \quad (8)$$

式中, u_p 为标准正态分布的百分位值, $u_p = \Phi^{-1}(F)$, $\Phi(x)$ 为标准正态分布函数, F 为失效概率.假定斜率为3,可得实用的 $P-S-N$ 曲线方程为:

$$\lg N_f = 12.4328 + 0.2162u_p - 3\lg S_r. \quad (9)$$

3.3 起重机焊接箱形梁的寿命估算

传统的随机疲劳寿命估算是先将载荷谱简化成一系列的阶梯程序载荷谱,然后选择适当的累积损伤理论来进行损伤的累积计算.随着实验技术及计算机技术的改进与发展,应用计算机仿真方法对工程结构在随机载荷下的疲劳过程进行模拟分析已成为可能.作者曾研究和开发了疲劳载荷信号的模拟发生程序及相应的统计计数方法.文献[12]采用随机变量来描述疲劳载荷,讨论了如何应用蒙特卡罗方法来产生给定分布的伪随机数序列以进行疲劳载荷的计算机模拟;并且基于雨流法的基本原理,对“三峰谷计数法则”作了改进,提出了一种能与

载荷信号的发生同步进行的统计计数的计算机算法。

本文在上述工作的基础上,采用前面提出的非线性疲劳损伤累积模型,发展了一种利用计算机仿真方法对工程结构在随机荷载作用下的疲劳寿命进行估算的模拟算法,其程序框图如图2所示。作为算例,用所提出的损伤模型对随机荷载作用下的起重机焊接箱形梁进行了疲劳寿命估算,模拟计算结果示于表3。计算时, α 的取值引用了与国产Q235钢类同的A36钢的试验结果^[11,13]:

$$\lg(\alpha - 1) = 0.764 - 0.87 \lg S_r, \quad (10)$$

式中 S_r 为应力幅(N/mm²)。

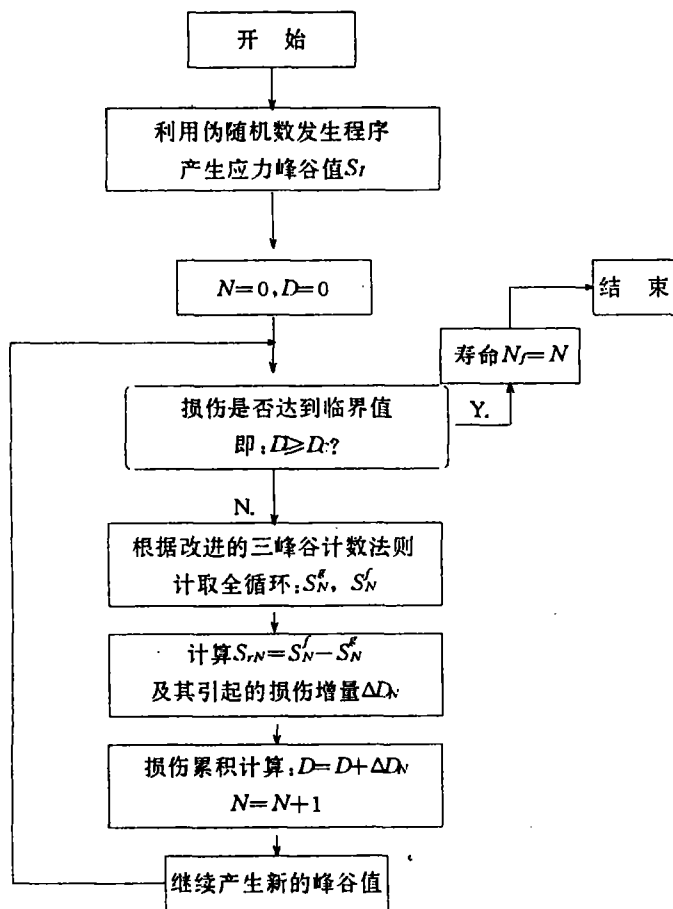


图2 估算疲劳寿命的模拟算法程序框图

为了分析用上述方法估算得到的寿命的可靠性,表3同时给出了按均方根法^[14]得到的疲劳寿命值。均方根法是将随机应力过程转换成为幅值等于其应力幅均方根值 ΔS_{rms} 的常幅疲劳载荷,利用常幅疲劳试验数据来进行随机疲劳寿命估算的方法,国内外研究成果表明此方法与实验情况较为符合。从表中数据的比较可见,两种方法的估算结果十分接近,且模拟计算得到的寿命略小于用均方根法求得的寿命,这也在一定的程度上反映了本文所提出的模拟算法和

损伤法则是实用可行的。

4 结 论

(1) 鉴于疲劳损伤的累积过程从本质上讲是一种非线性的不可逆过程,某一加载时刻的损伤量与当前的损伤状态有关,本文在充分利用已有实验数据和研究成果的前提下,通过定义单个载荷循环所造成的疲劳损伤量,给出了一个适合于对疲劳过程进行模拟分析的非线性疲劳损伤累积模型。

(2) 通过对循环软化材料 16Mn 和循环硬化材料正火 45 钢在多级载荷下的疲劳寿命分析结果与实验数据的比较,证明该损伤模型能够正确反映载荷次序效应等疲劳累积损伤规律,且具有令人满意的精度。

(3) 根据本文所提出的非线性疲劳损伤累积模型,发展了一种利用计算机仿真方法对工程结构在随机载荷作用下的疲劳寿命进行估算的模拟算法,将其应用于随机载荷作用下的起重机焊接箱形梁的疲劳寿命分析,结果表明本文所提出的模拟算法和损伤法则是实用和可行的。

表 3 随机疲劳寿命(cycles) 估算结果

最大应力幅 $S_{r,max}$ (MPa)	K_f	模拟算法 N_1	$\Delta S_{r,max}$ (MPa)	均方根法 N_2	相对误差 (%)
185	1.0	448771	181.6	452036	- 0.722
	0.5	1164822	130.8	1210268	- 3.755
	0.25	2440959	100.5	2666078	- 8.444
	0.125	5332292	74.9	6453962	- 17.40
150	1.0	841798	147.3	848112	- 0.745
	0.5	2183936	106.1	2270358	- 3.810
	0.25	4574529	81.5	4998813	- 8.488
135	1.0	1154670	132.6	1163216	- 0.735
	0.5	2995043	95.5	3114855	- 3.850
	0.25	6272038	73.4	6861132	- 8.590
110	1.0	2134163	108.0	2150444	- 0.757
	0.5	5533693	77.8	5754959	- 3.840
平 均 值					- 5.095

参 考 文 献

- 1 Bui-Quoc T, et al. Cumulative Fatigue Damage under Stress Controlled Conditions. J. Basic Engng, Trans. ASME, 93, 1971, 691~698
- 2 张安哥, 谢敏. 疲劳失效的连续损伤力学估算方法. 华东交通大学学报, 1995, 12 (1): 11~18
- 3 Chaboche J L, Lesne PM. Non-Linear Continuous Fatigue Damage Model. Fatigue and Fracture of Engng. Mater. Struct., 1988, 11 (1): 1~17
- 4 Lemaitre. J. How to Use Damage Mechanics. Nuclear Engineering and Design, 1984, 80: 233~245
- 5 谢里阳, 徐灏, 王德俊. 一个新的连续损伤累积模型. 机械工程学报, 1991, 27 (1): 52~57
- 6 Kliman V. Fatigue Life Estimation under Random Loading Using the Energy Criterion. Int. J. Fatigue, 1985, 7 (1): 39~44
- 7 谢里阳, 徐灏, 王德俊. 疲劳过程中材料强化和弱化现象的探讨. 机械强度, 1991, 13 (1): 32~35
- 8 起重机设计规范. GB 3811-83
- 9 李鹏. 桥式起重机主梁变幅疲劳寿命试验载荷谱. 机械强度, 1991, 13 (3): 34~36
- 10 翟甲昌等. 桥式起重机焊接箱形梁的疲劳试验. 起重运输机械, 1994 (2): 3~8
- 11 潘长松. 桥式起重机箱形主梁的疲劳试验. 起重运输机械, 1984, (1): 17~28
- 12 谢敏, 张安哥. 一个与载荷模拟同步进行的三峰谷计数法则. 华东交通大学学报, 1994, 11 (4): 1~7,
- 13 Murad F A. Fatigue of Cover Pleated Beams under Varying Load. Journal of the Structural Division, Proceeding of the ASCE, 1972. 4
- 14 Barson J M. Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading. ASTM STP595, 1976, 217~235

A Nonlinear Accumulative Damage Model and Its Application

Xie Min

Zhang Ange

Li Qidie

Li Dalen

Abstract

Proceeding from the definition of a damage variable of one load cycle, this paper presents a nonlinear accumulative damage model which is available for the simulated analysis of the fatigue process. It is proved that the new damage model is able to correctly describe the loading order effect and other fatigue damage rules by comparing the analysis results with the experimental data of two kinds of steel materials subjected to multi-step loadings. As an application of the damage model, the fatigue life of the welded box girder of crane under random loading is predicted by an approach of computer simulation.

Key words Fatigue; Damage; Life prediction; Simulation