

单向帘线/橡胶复合材料的疲劳损伤模型与疲劳寿命预报

Fatigue Damage Model and Fatigue Life Prediction of Unidirectional Rubber Composites

刘宇艳, 万志敏, 田振辉 (哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

LIU Yu-yan, WAN Zhi-min, TIAN Zhen-hui

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

摘要: 将不可逆热力学和损伤力学应用于橡胶复合材料的疲劳研究, 在大量试验工作的基础上, 选择适当的热力学势函数, 建立了橡胶复合材料的损伤演变方程和橡胶复合材料的疲劳寿命预报方程。应用本模型对单向橡胶复合材料的疲劳寿命进行了预报, 发现理论预测值与试验结果比较符合。

关键词: 橡胶复合材料; 疲劳损伤模型; 疲劳寿命预报

中图分类号: TB332; V255.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2003) 04-0027-03

Abstract: Irreversible thermodynamics and damage mechanics are applied to fatigue damage of rubber composites. Based on a large number of experiments, a suitable thermodynamics potential function is selected and then a nonlinear damage evolution equation of rubber composites and the fatigue life prediction equation of rubber composites is established. The experiment results indicate a reasonable good agreement between the model and the actual data. This shows that it is feasible for the established model to predict fatigue life of rubber composites.

Key words: rubber composites; fatigue damage model; fatigue life prediction

对于承受循环载荷的轮胎, 橡胶复合材料的疲劳特性决定了轮胎使用的安全性和可靠性。循环载荷将导致橡胶复合材料损伤, 如基体裂纹、界面脱粘、分层、甚至帘线断裂等, 而且损伤随时间累积。当疲劳损伤累积到某一临界值时材料发生破坏。以往采用整胎的疲劳试验来预测轮胎的耐久性。常借助于经验和半经验公式, 其研究结果在实际生产和应用中并不理想。

近年来, 由于损伤力学在复合材料中的应用, 给复合材料疲劳损伤的研究带来了广阔的前景^[1-4]。但是复合材料损伤具有各向异性特点, 加之损伤力学又刚刚形成, 因此以损伤力学为基础对复合材料进行疲劳损伤及疲劳寿命预报的研究并不全面和深入, 尤其对于橡胶复合材料这方面的研究还未见有关文献报道。本研究对此作了初步的探索。

1 试验过程

1.1 试件制备

本研究所选用的试件为单向帘线增强橡胶复合材料, 有 A, B 两种。

试件 A: 基体材料为碳黑填充的天然橡胶, 增强

材料为 1500D/2 聚酯帘线, 帘线体积含量 13.4%。

试件 B: 基体材料为碳黑填充的天然橡胶与丁苯橡胶, 增强材料为 29/92 人造丝帘线, 帘线体积含量 10.6%。

试件经模压成型, 为哑铃状, 有效工作段尺寸为 $60\text{mm} \times 25\text{mm} \times 2.7\text{mm}$ 。

1.2 测试过程

在自行建立的橡胶复合材料疲劳测试系统上进行定载荷控制的正弦拉-拉疲劳测试, 试件沿纤维排列 X 轴承受单向周期载荷 $P = P_0 + P^* \sin \omega t$ 。

2 疲劳损伤模型

为使橡胶复合材料的疲劳损伤累积研究简化, 提出如下假设:

1) 应力在试件的有效工作段上分布均匀, 忽略边缘区域的存在造成的影响。

2) 将所研究的复合材料体系看作一个连续体。损伤模型将反映各种形式的损伤机理, 如基体中孔洞的增长和汇集、纤维断裂、界面脱粘等。各种损伤并不加以区分, 通过损伤因子 D 反映出来。由于试件只承受单向应力, 故而仅考虑 D_{11} 的演化。

3) 损伤初始值为 0, 达到破坏时为 1。

4) 材料即将破坏时, 损伤率 $\frac{dD}{dN}$ 为无穷大。

损伤增长率与应力幅值 σ^* 、平均应力 σ_0 、加载频率 f 以及当时的损伤值 D 有关, 则有

$$\dot{D} = F(\sigma^*, \sigma_0, f, D) \quad (1)$$

在本疲劳试验中, 试件的蠕变损伤较小, 试件的表面温度分布较为均匀, 故在耗散余势中不考虑其他耗散内变量和温度梯度的影响。取耗散余势为如下形式:

$$\varphi = \frac{A}{B+1} \left(\frac{Y}{A} \right)^{B+1} \cdot \frac{(1-D)^{1.9B}}{\sigma_0^B} \quad (2)$$

式中 σ_0 为平均应力。

损伤演化规律可以写为^[5]:

$$\dot{D} = H(\sigma^* - k_0) \frac{\partial \varphi}{\partial Y} \quad (3)$$

其中 k_0 是相当于门槛值的参数, σ^* 为施加的应力幅值, $H(\cdot)$ 为 Heaviside 跃阶函数, 其定义为

$$H(x) = \begin{cases} 0 & (\text{if } x < 0) \\ 1 & (\text{if } x \geq 0) \end{cases} \quad (4)$$

那么

$$\dot{D} = H(\sigma^* - k_0) \frac{\partial \varphi}{\partial Y} = H(\sigma^* - k_0) \left(\frac{Y}{A} \right)^B \frac{(1-D)^{1.9B}}{\sigma_0^B} \quad (5)$$

而单向应力下的损伤应变能释放率 Y 可近似取为^[5]

$$Y = \frac{\sigma^2}{2E_{pi}(1-D)^2} \quad (6)$$

式中 E_{pi} 为试件的初始循环模量。

进而得

$$\dot{D} = \begin{cases} \frac{\sigma_{\max}^2}{(2AE_{pi})^B} \cdot \frac{1}{(1-D)^{0.1B}} \cdot \frac{1}{\sigma_0^B} & (\text{if } \sigma^* \geq k_0) \\ 0 & (\text{if } \sigma^* < k_0) \end{cases} \quad (7)$$

如以 σ_{\max} 、 σ_{\min} 表示一个应力循环的最大、最小应力, 设在一个应力循环中, 损伤变量保持不变, 于是在一个应力循环中所产生的 D 的周变化率为

$$\begin{aligned} \frac{dD}{dN} &= 2 \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \frac{\sigma_{\max}^{2B-1}}{(2AE_{pi})^B} \cdot \frac{1}{(1-D)^{0.1B}} \cdot \frac{1}{\sigma_0^B} d\sigma \\ &= \frac{\sigma_{\max}^{2B} - \sigma_{\min}^{2B}}{(2AE_{pi})^B \cdot B} \cdot \frac{1}{(1-D)^{0.1B}} \cdot \frac{1}{\sigma_0^B} \\ & \quad (\text{if } \sigma^* \geq k_0) \end{aligned} \quad (8)$$

由于

$$\sigma_{\max} = \sigma_0 + \sigma^*$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_0 - \sigma^*$$

则损伤演化方程为:

$$\frac{dD}{dN} = M \frac{(\sigma_0 + \sigma^*)^{2B} - (\sigma_0 - \sigma^*)^{2B}}{E_{pi}^B (1-D)^{0.1B} \cdot \sigma_0^B} \quad (\text{if } \sigma^* \geq k_0) \quad (9)$$

$$\text{式中 } M = \frac{1}{(2A)^B \cdot B}$$

M, B 为材料常数, 可由试验确定。

从 (9) 式看出, 这是一个非线性损伤累积规律。损伤率不仅与应力幅值 σ^* 、平均应力 σ_0 有关, 还和当时的损伤值 D 有关。而频率 f 对损伤率的影响则可以通过初始循环模量 E_{pi} 来反映。

图 1 为试件的初始循环模量 E_{pi} 与频率 f 的关系。可以看出, 在所测试的频率区间 (1~8Hz) 数据的分散性不大, 试件的初始循环模量和频率呈线性关系。采用最小二乘法对其进行拟和, 得

$$E_{pi} = P + Q \cdot f \quad (10)$$

试件 A: $P = 657.184, Q = -5.246$

试件 B: $P = 615.365, Q = -0.134$

式 (10) 是所有试件的平均值, 它的适用范围为 1~8Hz, 在此范围之外是否适用有待于验证。

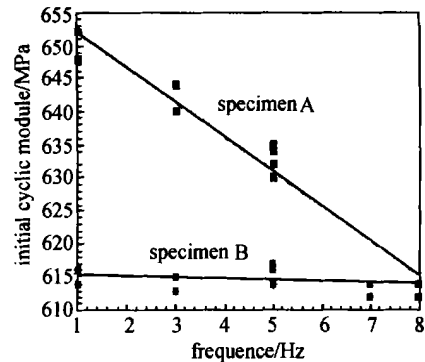


图 1 试件的初始循环模量与频率的关系曲线

Fig. 1 The relationship between initial cyclic module of specimen and frequency

3 疲劳寿命预测及实验验证

按初始条件, $N = 0$ 时, $D = 0$, 对式 (9) 积分, 则

$$\begin{aligned} \int_0^D \frac{1}{(1-D)^{0.1B}} dD &= M \int_0^N \frac{(\sigma_0 + \sigma^*)^{2B} - (\sigma_0 - \sigma^*)^{2B}}{(p + Q \lg f)^B \sigma_0^B} dN \\ & \quad (\text{if } \sigma^* \geq k_0) \end{aligned} \quad (11)$$

便可以求出循环周期 N 与损伤变量 D 之间的关系

$$\frac{1}{0.1B+1} [1 - (1-D)^{0.1B+1}]$$

$$= M \frac{(\sigma_0 + \sigma^*)^{2B} - (\sigma_0 - \sigma^*)^{2B}}{(P + Q \lg f)^B \sigma_0^B} N \quad (\text{if } \sigma^* > k_0) \quad (12)$$

当 $N = N_f$ 时, $D = 1$, 由 (12) 式可得

$$\frac{1}{N_f} = (0.1B + 1) \cdot M \frac{(\sigma_0 + \sigma^*)^{2B} - (\sigma_0 - \sigma^*)^{2B}}{(P + Q \lg f)^B \sigma_0^B} \quad (\text{if } \sigma^* > k_0) \quad (13)$$

在给定 σ_0, σ^*, f 的情况下, 根据得到的 N_f , 就可以确定参数 M, B 。采用最小二乘法拟合试验数据, 确定参数如下

试件 A: $M = 2.875 \times 10^{125}, B = 149.553$

试件 B: $M = 5.563 \times 10^{32}, B = 32.904$

将 M, B 代入式 (13), 即可进行任意 σ_0, σ^*, f 条件下的疲劳寿命预测 (图 2)。图中各种线型为不同频率下本模型的预测值, 其中的小圆点和矩形为试验数据。可以看出, 理论预测值与试验结果比较符合。图 3 给出理论上平均应力及应力幅值对单向橡胶复合材料疲劳寿命的影响。

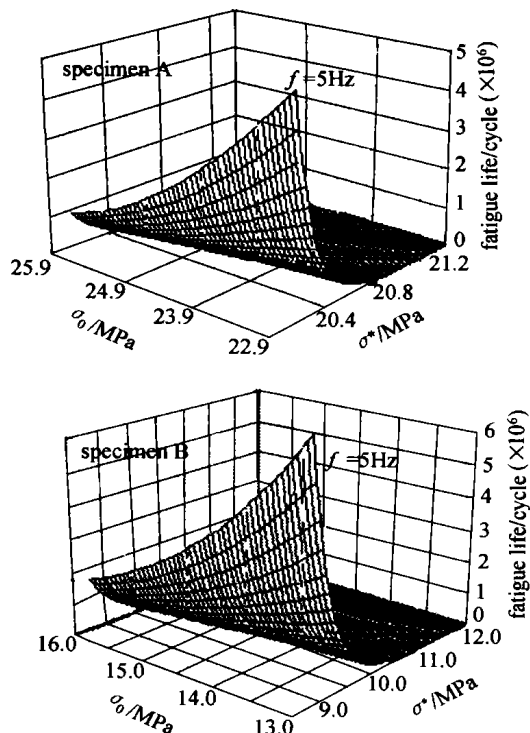


图 3 试件疲劳寿命随应力幅值和平均应力的变化 (模型预测值)

Fig. 3 Compilation of life data as a function of stress amplitude and average stress of specimen

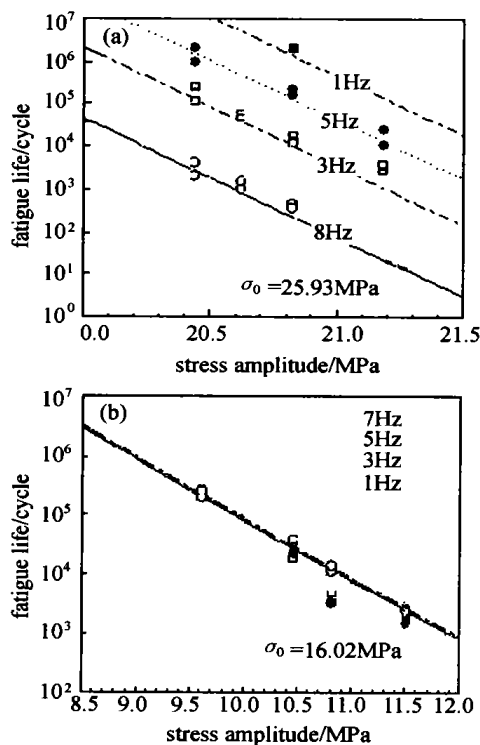


图 2 试件疲劳寿命随应力幅值和频率的变化 (模型预测值与试验数据的比较)

Fig. 2 Compilation of life data as a function of stress amplitude and frequency of specimen (Comparison of basic model with experimental data)

4 结论

(1) 将不可逆热力学和损伤力学应用于橡胶复合材料的疲劳研究, 在大量试验工作的基础上, 选择适当的热力学势函数, 建立了橡胶复合材料的损伤演变方程。

(2) 建立了橡胶复合材料的疲劳寿命预报方程。经试验验证, 理论预测值与试验结果比较符合, 表明本模型可以用于单向橡胶复合材料的疲劳寿命预报。

参考文献

- Camponeschi E T. An Investigation of Stiffness Reduction as an Indication of Fatigue Damage in Graphite/Epoxy Composites [J]. Blacksburg [D]. M S Thesis, VPI, Virginia, 1980: 98 - 108.
- George Z V and Peter I K. Damage of Fiber-Reinforced Composite Materials with Micromechanical Characterization [J]. Int J Solides Structures, 1993, 30 (20): 2757- 2778.
- Zhanjun Gao. A Cumulative Damage Model for fatigue Life of Composite Laminates [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1994, 13 (2): 128- 141.
- Fawaz Z and Ellyin F. Fatigue Failure Model for Fiber-reinforced Materials Under General Loading Conditions [J]. Journal of Composite Materials, 1994, 28 (15): 1432- 1441.

头频率越高, 波长就越小, 系统可以实现的分辨率就越高。假设复合材料的声速为 3000m/ s, 探头频率可以做到 10 ~ 15M Hz, 可算出波长为 0. 2 ~ 0. 3mm, 这样超声层析的分辨率可以最高达到 0. 1mm。

另外需要指出的是闸门高度调节。在扫描成像前, 调节闸门到合适的高度以便于达到更好的成像效果。但当扫描完毕后或查看以前的扫描图像时, 需要调整闸门的高度, 从而调节图像的颜色显示。这时不必重新扫描工件, 而只需调节闸门的高度, 然后进行重新处理便可得到理想的成像效果。

4 结论

针对复合材料检测进行了手动扫描超声成像技术的研究, 运用成像检测技术和手动扫描定位技术, 设计并完成了工程化的便携式手动扫描超声成像检测系统, 该系统扫描最大范围为 200mm × 200mm; 定位精度为 0. 1mm。便携式手动扫描架的采用克服了机械定位在许多场所设备安装的困难, 在野外作业时和对形状位置不定的在役工件进行检测时更加方便灵活, 不受场地、工件形状等限制, 应用面更加广阔。系

(上接第 23 页)

物体大。扭转体直径过大是造成平直度数据起幅大的根本原因。抛物体型面公差和扭转板平直度完全达到了技术要求, 表明目前采用的制造工艺稳定、可靠。

表 3 显示, 火控天线电性能不但满足指标要求, 而且各项数据与瑞典同类天线性能数据相当。

表 3 天线电性能测试结果
Table 3 Test results of the electricity properties of antenna

项性 目能	窄波束			天线效率
	天线增益/ dB	付瓣电平/ dB	驻波	
某型天线	35. 5	- 25	< 1. 5	55%
瑞典天线 ^{* 2]}	35	- 25	< 1. 5	55%
英国天线 ^{* 2]}	34	- 24. 5	< 1. 6	53%
法国天线 ^{* 2]}	34	- 24	< 1. 6	50%
指标要求	> 33. 5	< - 22	< 1. 6	> 50%

* 表中天线均属变态卡塞伦天线

3 结论

- (1) 原材料及成型工艺参数选择合理, 保证了天线各项性能达到设计指标要求。
- (2) 湿法铺层真空加压适用于成型结构和型面要求复杂的制件。

统的研制成功对于推广超声成像检测技术的工程实用具有重要的意义。

参考文献

1] Chern E James · Concept of non -destructive evaluation J] · Materials Evaluation, 1991, 49 (9): 1228.

2] 薛克兴 · 复合材料结构的损伤与修补 M] . 北京: 航空工业出版社, 1992. 8- 13.

3] Rose J L, Y H Jeong. Utility of a Probability-Density-Function Curve and F-Maps in Composite Material Inspection J]. Experimental Mechanics, 1982, 22 (4): 155- 160.

4] 郑中兴, 藤永平, 崔建英, 等. 全数字化超声波探伤成像仪研制 J] . 北方交通大学学报, 1995, 19 (3): 350- 356.

5] 袁易全 · 超声换能器 M] . 南京: 南京大学出版社, 1992. 221 - 231.

6] 美国无损检测学会编 · 美国无损检测手册-超声卷 (上下册) M] . 美国无损检测手册译审委员会译. 上海: 世界图书出版公司, 1996.

收稿日期: 2002-03-10; 修订日期: 2002-06-10
作者简介: 张锐 (1975-) 男, 硕士, 研究方向为超声成像检测的研究与高精度超声测厚系统的研究, 联系地址: 湖南省新邵县 8 号信箱教育科张华转 (422915)。

(3) 研制成功的先进天线是目前国内性能比较先进的机载天线, 具有高增益、低付瓣、高效率的特点, 其电性能水平已达到国外同类天线性能水平。

参考文献

1] 陈绍杰等 · 复合材料设计手册 M] . 北京: 航空工业出版社, 1990.

2] M I 斯科尔尼 · 雷达手册 M] . 北京: 国防工业出版社, 1978.

收稿日期: 2002-03-14; 修订日期: 2002-11-05
作者简介: 郝巍 (1968-) , 男, 工程师, 现从事蜂窝及夹层结构研究开发工作, 联系地址: 北京 81 信箱 12 分箱 (100095)

(上接第 29 页)

5] 杨光松 · 损伤力学与复合材料损伤 M] . 北京: 国防工业出版社, 1995. 117- 124.

基金项目: 黑龙江省自然科学基金, 哈尔滨工业大学跨学科交叉性研究基金资助项目 (HIT. MD2000. 20)
收稿日期: 2002-06-25; 修订日期: 2002-10-20
作者简介: 刘宇艳 (1971-) , 女, 博士, 副教授, 主要从事橡胶复合材料及树脂基复合材料的改性与疲劳损伤研究, 已发表相关论文 25 篇, 联系地址: 哈尔滨工业大学 410 信箱 (150001)。