

橡胶复合材料疲劳损伤研究方法概述

田振辉, 万志敏, 杜星文

(哈尔滨工业大学 复合材料研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 介绍了撕裂能法、疲劳寿命曲线法和损伤力学方法在橡胶复合材料疲劳损伤研究中的应用。撕裂能法只能适用于特定的材料模型和载荷范围; 采用疲劳寿命曲线法, 只有通过获取大子样空间, 运用概率统计的方法来处理, 才能得到准确的疲劳特性和可靠寿命; 研究层合的橡胶复合材料的疲劳损伤更具实际意义。

关键词: 橡胶复合材料; 疲劳; 损伤

中图分类号: V255⁺.3; TB332 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-890X(2001)10-0628-04

汽车轮胎在工作状态下主要承受交变载荷作用, 其寿命与橡胶复合材料的疲劳特性密切相关^[1], 因此近年来, 橡胶复合材料的疲劳特性一直受到关注^[2~5]。

橡胶复合材料除具有一般复合材料的特点外, 还具有低模量、高弹性的特点, 而且由于基体材料具有明显的粘弹滞后特性, 大变形条件下存在严重的热力耦合作用, 理论上的深奥和实验技术上的障碍使橡胶复合材料疲劳损伤研究的进展迟缓^[6]。本文对橡胶复合材料疲劳损伤研究方法进行概述。

1 撕裂能法

从1953年 Rivlin^[7] 最早将撕裂能理论引入橡胶的疲劳研究以来, 断裂力学得以在橡胶领域广泛应用。1979年, Breidenbach等^[4] 将这一方法推广, 研究含双层对称帘线的橡胶复合材料的疲劳破坏, 分析了层间裂纹的扩展问题。

撕裂能 T 的最初数学定义式为:

$$T = -\frac{\partial U}{\partial A} \quad (1)$$

式中 U ——弹性应变能;

A ——断裂表面积(无应变状态)。

在循环载荷作用下, 裂纹增长速率为:

$$\frac{dc}{dn} = fT_{\max} \quad (2)$$

式中 c ——裂纹长度;

n ——周期数;

T_{\max} ——每一周期所达到的最大撕裂能。

裂纹长度从 c_i 增长到 c_j 所需的周期数可以通过对式(2)的积分得到

$$n = \int_{c_i}^{c_j} \frac{1}{fT_{\max}} dc \quad (3)$$

代入 T 与 c 的关系式, 就可得到疲劳寿命与变形幅值、初始裂纹尺寸、裂纹增长特性之间的定量关系。

研究认为, 承受拉伸循环变形的矩形层合件中心区域的应变能是裂纹增长的主要原因, 当层间裂纹扩展 δc 时, 单位长度材料的能量损失 δV 为:

$$\delta V = W_c t \delta c \quad (4)$$

式中 W_c ——试件中心区域的应变能密度;

t ——试件厚度。

撕裂能表达式为:

$$T = \partial V / \partial c = W_c t \quad (5)$$

1989年, Huang等^[3] 采用帘线完全被橡胶包覆的复合材料模型, 研究了帘线端头处裂纹的产生过程。由于周期性载荷使帘线端头处的橡胶产生高应力集中, 该处橡胶便产生铜钱状裂纹。材料中产生半径为 c 的铜钱状裂纹所导致的能耗可表示为:

作者简介: 田振辉(1973-), 男, 河北任丘人, 哈尔滨工业大学在读博士生, 主要从事橡胶复合材料的疲劳损伤及寿命预报的研究。

$$\Delta U = kWc^3 \quad (6)$$

式中 W 为应变能密度。

铜线状裂纹扩展时的撕裂能(应变能释放速率) T 为:

$$T = \frac{\partial(\Delta U)}{\partial A} = \frac{\partial(\Delta U)}{\partial c} \cdot \frac{\partial c}{\partial A} =$$

$$\begin{cases} N = \frac{1}{AKW} \ln \frac{KWc_1 - T_0}{KWc_0 - T_0} & T_0 < T < T_1 \\ N = \frac{1}{(\beta-1)B(KW)^\beta} \left(\frac{1}{c_0^{\beta-1}} - \frac{1}{c_1^{\beta-1}} \right) & T < T < T_c \end{cases} \quad (8)$$

以断裂力学为基础的撕裂能法在橡胶复合材料疲劳损伤研究中已取得了初步进展,但其主要困难在于确定撕裂能、裂纹尺寸、载荷或变形间的关系。另外,该方法假定材料疲劳破坏的主要原因是橡胶相裂纹的增长,没有考虑帘线中纤维的断裂和橡胶-帘线界面剥离。因此,撕裂能法基于橡胶相理想裂纹的假设只能适用于特定的材料模型和载荷范围。

2 疲劳寿命(S-N)曲线法

1992 年,万志敏等^[4]以人造丝增强橡胶复合材料为对象,研究了单向帘线-橡胶复合材料的疲劳寿命,试样应力与应变循环次数(N)的关系曲线如图 1 所示。

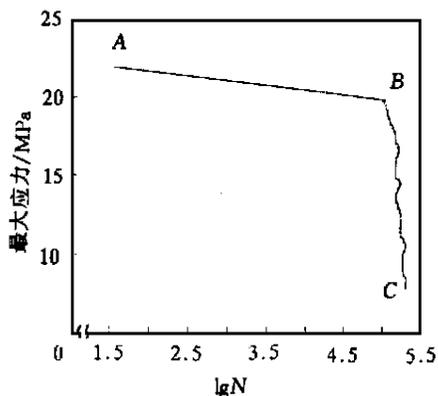


图 1 试件应力与循环次数的关系曲线

研究表明,单向帘线-橡胶复合材料的疲劳损伤表现为阶段过程,稳态损伤(AB 段)过程和加速损伤导致的断裂过程(BC 段)。在应变比为 0.1、频率为 3 Hz 时的 $S-N$ 曲线如图 2 所示。

$$\frac{3kWc}{2\pi} = KWc \quad (7)$$

其中, k 是与应变状态有关的常数, $K = \frac{3k}{2\pi}$ 。

结合 Lake 等^[8]提出的疲劳裂纹增长四阶段规律, Huang 最终得到的材料疲劳寿命方程为:

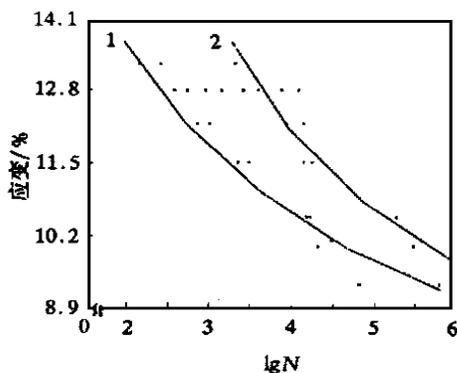


图 2 疲劳寿命图

1—初始疲劳; 2—最终疲劳

稳态疲劳寿命(即疲劳寿命)方程为:

$$e_b = 13(1 + 134/N_b^{0.17}) \quad (9)$$

式中 e_b ——施加的应变值;

N_b ——稳态疲劳寿命。

1994 年, Lee 等^[5,9]采用尼龙增强橡胶来模拟航空斜交轮胎的胎体材料,评价了试样的尺寸、加载频率及波形对疲劳寿命的影响。图 3 所示为不同长/宽比(L/W)的试件(W 为 19.05 mm)在频率分别为 1 和 10 Hz 时的 $S-N$ 曲线。

显然,加载频率使疲劳极限降低,对疲劳寿命影响很大,而试样 L/W 的影响不大。

作者还研究了载荷序列对损伤累积过程的影响,提出了基于动态蠕变的线性累积损伤模型。对于两级加载,材料至整体破坏时的累积损伤为:

$$D = \Delta\epsilon_1/\Delta\epsilon_{11} + \Delta\epsilon_2/\Delta\epsilon_{12} \quad (10)$$

式中 D ——累积损伤值;

$\Delta\epsilon_1$ ——第一级加载的动态蠕变量;

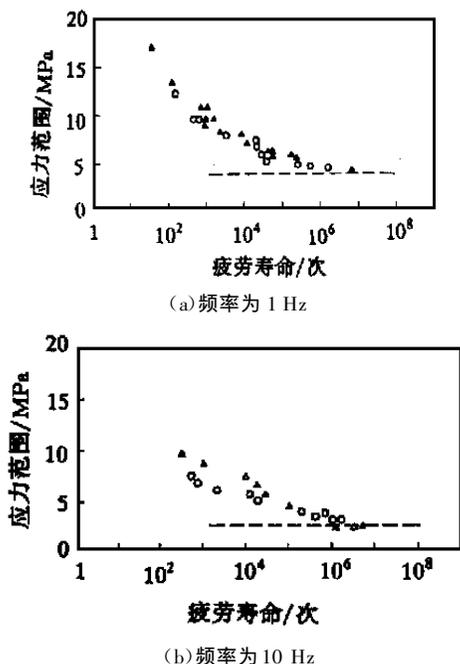


图3 橡胶复合材料应力范围与疲劳寿命的关系曲线

△— $L/W=3.33$; ○— $L/W=5.33$

△ ϵ_2 ——第二级加载的动态蠕变量;

△ ϵ_{f1} ——第一级载荷单独作用时材料至整体破坏的动态蠕变量;

△ ϵ_{f2} ——第二级载荷单独作用时材料至整体破坏的动态蠕变量。

$S-N$ 曲线对于研究橡胶复合材料的疲劳寿命是非常必要的, 它所表现出的特征能使较大范围的应力、应变与疲劳寿命间的关系一目了然, 可为材料的优化提供依据。但是由于疲劳试验数据的分散性、试件加工尺寸的偏差、材料的原始缺陷等原因, 只有通过获取大子样空间, 运用概率统计的方法来处理, 才能得到准确的疲劳特性和可靠寿命。

3 损伤力学方法

1998年, 刘宇艳等^[10]根据损伤力学和不可逆热力学, 以循环蠕变为损伤变量, 建立了单向橡胶复合材料的损伤演化方程:

$$\frac{\partial D}{\partial N} = \frac{M[(\sigma_0 + \sigma^*)^{2B} - (\sigma_0 - \sigma^*)^{2B}]}{E_{pi}^B (1-D)^{0.1B} \sigma_0^B} \quad (12)$$

式中 M, B ——材料常数;

σ^* ——拉伸应力幅值;

σ_0 ——平均应力;

E_{pi} ——初始循环模量。

这是一非线性损伤累积。损伤率不仅与应力幅值、平均应力有关, 还和当时的损伤值有关。而频率对损伤率的影响是通过初始循环模量反映的。

对该方程积分可得到疲劳寿命:

$$\frac{1}{N_f} = \frac{M[(\sigma_0 + \sigma^*)^{2B} - (\sigma_0 - \sigma^*)^{2B}]}{E_{pi}^B \sigma_0^B} \quad (0.1B + 1) \quad (13)$$

疲劳寿命与应力幅值和频率的关系如图4所示。

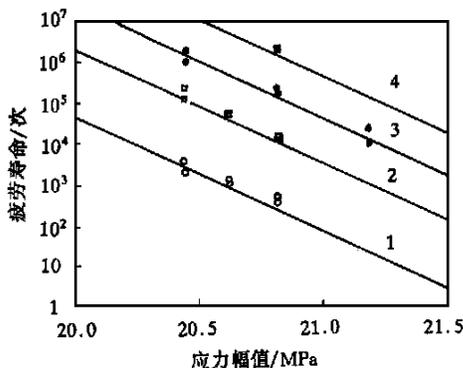


图4 疲劳寿命与应力幅值和频率的关系

1—8 Hz; 2—5 Hz; 3—3 Hz; 4—1 Hz。

平均应力为 25.9 MPa

目前, 以损伤力学为基础对橡胶复合材料疲劳损伤演化的研究仅限于单层材料, 而实际结构中使用的多为层合材料, 层合材料的一个潜在问题就是层间开裂。这类材料的疲劳损伤机理为: 在循环载荷作用下, 裂纹在层间产生并向内部扩展, 最终脱层破坏。因此, 研究层合的橡胶复合材料的疲劳损伤更具实际意义。这方面的研究工作正在展开。

4 结论

(1) 撕裂能法基于橡胶相理想裂纹的假设只能适用于特定的材料模型和载荷范围。

(2) $S-N$ 曲线对于研究橡胶复合材料的疲劳寿命是非常必要的, 只有通过获取大子样空间, 运用概率统计的方法来处理, 才能得到准确的疲劳特性和可靠寿命。

(3)对层合的橡胶复合材料的疲劳损伤的研究更具实际意义。

参考文献:

- [1] Crosch K. Rolling resistance and fatigue life of tires[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1988, 61(1): 42-63.
- [2] Breidenbach R F, Lake G J. Mechanics of fracture in two-ply laminates[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1979, 52(1): 96-111.
- [3] Huang Y S, Yeoh O H. Crack initiation and propagation in model cord-rubber composites[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1989, 62(4): 709-731.
- [4] Wan Z M, Du X W, Yao M, *et al.* Strain fatigue life and prediction of rayon cord reinforced rubber[A]. Organization Committee of International Rubber Conference. International Rubber Conference[C]. Beijing China; CRC, 1992. 323-326.

- [5] Lee B L, Liu D S. Cumulative damage of fiber-reinforced elastomer composite under fatigue loading[J]. Journal of Composite Materials, 1994, 28(13): 1261-1286.
- [6] 刘宇艳. 橡胶复合材料的疲劳[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1998.
- [7] Rivlin R S, Thomas A G. Rupture of rubber. I. Characteristic energy for tearing[J]. J. Poly. Sci., 1953, 10(3): 291-313.
- [8] Lake G J, Lindley P B. Mechanical fatigue limit for rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1966, 39(2): 348-364.
- [9] Lee B L, Liu D S. Fatigue of cord-rubber composites[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1994, 67(5): 761-774.
- [10] 刘宇艳, 万志敏, 田振辉, 等. 单向聚酯帘线增强橡胶材料疲劳特性研究[J]. 复合材料学报, 1998, 15(4): 97-101.

收稿日期: 2001-04-30

SANS®

深圳市新三思计量技术有限公司



通过德国

ISO 9001质量体系认证

24h提供解决方案

服务热线: (0755) 3405001

EXJ2000系列为橡胶专用拉伸试验机, 主机为单柱型, 配有专门的侧立式大变形测量装置, 变形分辨率可达0.02mm, 128×64大屏幕液晶显示, 信息多、容量大、功能强, 可以测试五点的定伸长应力(五点可设定)、抗拉强度、延伸率等。

主要技术参数:

测力范围: $\pm 0.05\text{N} \sim \pm 500\text{N}$

测力精度: $\pm 1\%$

位移精度: $\pm 0.5\%$

转换速率: 50次/秒

有效行程: $\geq 750\text{mm}$

使用温度: 0~40℃

允许超载: 150%F·S

打印输出: 进口打印机

电源: 单相220V

重量: 约70kg

外形尺寸: 650mm×370mm×1400mm

主要型号: EXJ2101, EXJ2102, EXJ2502

其它产品

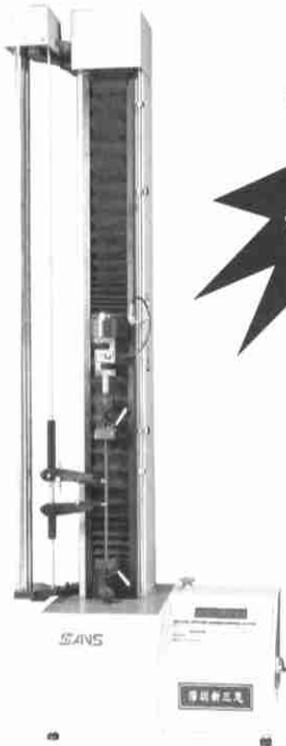
CMT系列微机控制电子万能试验机

EMT系列液晶电子拉力试验机

CHT系列微机液压万能试验机

SHT系列微机控制电液伺服万能试验机

ZBC系列摆锤冲击试验机



EXJ2000系列橡胶拉伸试验机

地址: 深圳市福田区金地工业区138栋首层 工厂: 深圳市福田区金地工业区128/133栋首层
电话: (0755)3415578 3405001 传真: (0755)3418301 邮编: 518048
E-mail:sans@sans.com.cn http://www.sans.com.cn