

# 橡胶疲劳性能的研究方法

刘宇艳 危银涛 杜星文

(哈尔滨工业大学 150001)

轮胎、胶带和减震件等多种橡胶制品通常是在周期性应力状态下使用的,橡胶材料的动态疲劳性能往往决定这些制品的疲劳寿命。因此,为了保证橡胶制品的使用安全性和可靠性,研究橡胶材料的动态疲劳特性具有极其重要的意义。但目前国内对橡胶疲劳性能的研究较少。本文介绍两种研究橡胶疲劳性能的方法

## 1 以断裂力学为基础研究橡胶的疲劳性能

### 1.1 断裂力学理论

Rivlin和 Thomas<sup>[1]</sup>最早将断裂力学应用于橡胶疲劳性能的研究,他们提出用以撕裂能为基础的参数研究橡胶的疲劳性能。这种能量法使不同几何形状和形变的试样的裂纹增长特性发生联系,也使裂纹增长和疲劳寿命定量联系起来,奠定了将试验测试和使用情况联系起来的基础。

Rivlin和 Thomas将裂纹增长单位面积释放的能量称为撕裂能( $T$ ),数学定义为:

$$T = -(\partial U / \partial A) \quad (1)$$

式中  $U$ ——弹性应变能;

$A$ ——断裂表面积(无应变状态)。

试验还表明<sup>[2,3]</sup>,裂纹增长速率与 $T$ 之间的关系与试样的几何尺寸无关。在周期性载荷作用下,裂纹增长速率为:

$$dc/dn = f(T_{\max}) \quad (2)$$

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。

裂纹从  $c_1$  增长到  $c_2$  所需的  $n$ ,可以通过积分(2)式得到:

$$n = \int_{c_1}^{c_2} \frac{1}{f(T_{\max})} dc \quad (3)$$

代入  $T$ 与  $c$ 的关系式,就可得到疲劳寿命与橡胶裂纹增长特性、形变幅度、初始裂纹或缺陷的尺寸的定量关系。

### 1.2 典型试验结果

图 1<sup>[4]</sup>为纯 SBR硫化胶典型疲劳裂纹增长速率( $\Delta c/\Delta n$ )与  $T$ 的关系曲线。从图 1看出, $T$ 值为  $100\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ 以下时, $\Delta c/\Delta n$ 与  $T$ 的关系几乎垂直渐近  $T_0$ ,该值称为  $T$ 的门坎值,在这个值以下不会出现可观察到的裂纹增长; $T$ 为  $800\sim 5000\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, $\Delta c/\Delta n$ 与  $T$ 的关系是斜率为  $m$ 的直线, $\Delta c/\Delta n = AT^m$ ;  $T$ 值较高时, $\Delta c/\Delta n$ 与  $T$ 的关系直线斜率较大,即随着  $T$ 的增加, $\Delta c/\Delta n$ 明显增大。

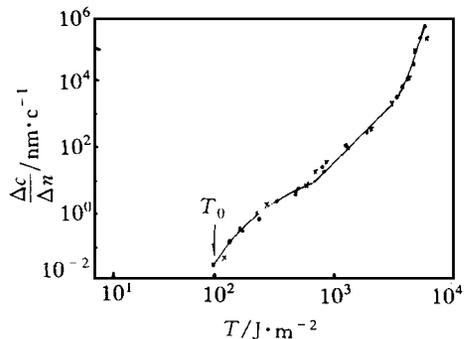


图 1 纯 SBR硫化胶的  $\Delta c/\Delta n$ 与  $T$ 的关系曲线

○—试样 1;×—试样 2 温度  $27^{\circ}\text{C}$ ;频率  $5\text{Hz}$

### 1.3 试验结果与实用性能比较

(1)斜交轮胎胎面花纹沟和子午线轮胎胎侧的裂纹增长 (FCG)。

Clapson和 Lake<sup>[1]</sup>应用裂纹张开技术估

算  $T$ , 分析了载重斜交轮胎花纹沟的  $FCG$  采用纯剪切试样模拟中心花纹沟基部的应变, 试验得到的  $FCG$  值 (假设最大花纹沟应变为 9%) 与载重轮胎在实际路面上的  $FCG$  值基本一致。Grosch<sup>[2]</sup> 先后研究了斜交轮胎胎面花纹沟和子午线轮胎胎侧动态应变 (均采用纯剪切试样), 探讨了其对裂纹增长特性的影响。试验表明, 斜交轮胎胎面花纹沟和子午线轮胎胎侧的  $FCG$  受胶料割口增长性能和  $T$  的控制。Young, kresge 和 Wallance<sup>[5]</sup> 采用带有预割口的拉伸试样得到了氯醚橡胶 (CHR)/EPDM/NR 和 NR/BR 并用胶的  $FCG$  数据。将该结果与子午线轮胎胎侧  $FCG$  测试结果比较, 当胎侧应变为 2% 时, 具有较好的一致性。Young<sup>[6]</sup> 采用液压伺服系统对纯剪切试样的测试结果表明, 纯剪切试样的厚度大于 2mm 时, 可以保证测出大部分试样的  $FCG$  值; 当应变为 1% 时, 试验值与轮胎转鼓试验测得的胎侧  $FCG$  值基本一致。

(2) 轮胎内衬层 (气密层) 和带束层隔离胶的  $FCG$

Young<sup>[2]</sup> 以断裂力学为基础, 采用  $FCG$  数据对炭黑在 CHR/NR 并用胶中的分布、轮胎内衬层 (气密层) 和带束层隔离胶进行了评价。结果表明, 采用  $FCG$  法可以成功地进行轮胎胶料配方的研究与筛选。

但是, 用断裂力学理论研究橡胶的疲劳性能存在着很多的不足, 主要为: 除几种简单形状试样外,  $T$  裂纹尺寸、力或形变间的关系相当复杂, 难以确定; 裂纹应变能变化太小, 不易测试。因此, 用断裂力学理论研究橡胶的疲劳性能受到一定限制。

## 2 用 $S-N$ 曲线研究橡胶疲劳性能

预测橡胶制品疲劳寿命最可靠的方法, 是在实际使用条件下对产品进行评价, 但这需要较长的试验时间和昂贵的费用。因此, 在一般情况下, 仅用硫化胶试样, 对其施加拉伸或压缩等动态负荷或应变作用, 将试样至断

裂时的疲劳次数 ( $N$ ) 绘制成  $S-N$  曲线 (实际上为应力  $e_{-1} \lg N$ , 伸长率  $\lambda_{-1} \lg N$  或应变  $X_{-1} \lg N$  曲线, 均称为疲劳寿命图), 以说明硫化胶的疲劳特性, 并进而预测制品的疲劳寿命。 $S-N$  曲线所表现出的特征, 能使较大范围的  $e$ ,  $\lambda$  和  $X$  与  $N$  之间的关系一目了然, 为判断制品是否适用提供有用的数据。

$S-N$  曲线在金属材料中已得到广泛应用, 但在橡胶材料中应用较少。这是因为橡胶制品的  $N$  一般高达  $10^6 \sim 10^8$ , 要得到完整的数据, 需要相当长的时间。为此, 深崛美英等<sup>[7]</sup> 提出了德墨西亚等加速试验方法, 能简单地求得从高应变至低应变的宽广区域的  $S-N$  曲线。首先求得具有不同预加割口  $C$  的多个试样的  $\lambda_{-1} \lg N$  曲线, 然后使这些曲线沿着  $N$  轴平行移动, 且与没有割口试样的  $S-N$  曲线 ( $C = C_0$ ,  $C_0$  为未试验试样的潜在缺陷尺寸) 重叠, 从而获得标准曲线。应用断裂力学理论和前人研究结果, 笔者得到了  $\lambda_{-1} \lg N$  的理论关系式:

$$\lg N = -U \left[ \lg f(\lambda) + \lg \left( \lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) \right] + [\lg G - \lg(U - 1) - (U - 1) \lg C_0 - U \lg E] \quad (4)$$

式中  $G$  和  $U$  — 割口增长常数;

$E$  — 弹性模量。

图 2 和 3 为纯 NR 和炭黑补强 NR 硫化胶的合成和理论  $S-N$  曲线。可以看出, 两条曲线是大体一致的, 只是在低应变区域合成  $S-N$  曲线较理论  $S-N$  曲线下偏。

傅政等<sup>[8]</sup> 用深崛美英提出的方法研究了 NR/BR 并用硫化胶的动态疲劳与断裂特征, 为其最佳共混比的选择提供了理论依据。附表给出了 NR/BR 并用硫化胶的特征参数。

从附表看出,  $U$  值随 BR 用量的增大而增大,  $C_0$  明显减小, 意味着裂纹的扩展速度增加。这表征了用德墨西亚等加速试验法得到的合成  $S-N$  曲线的变化规律。综合分析确定, NR/BR 并用比为 60/40~70/30 时的硫

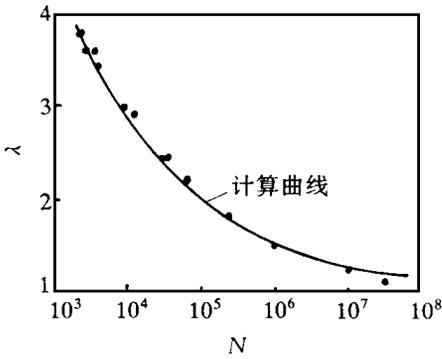


图 2 纯 NR 硫化胶合成 (实测点) 与理论  $S-N$  曲线

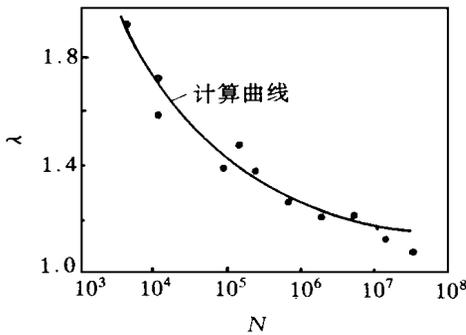


图 3 炭黑补强 NR 硫化胶合成 (实测点) 与理论  $S-N$  曲线

附表 NR/BR 并用硫化胶的特征参数

NR/BR 并用比	特征参数	
	U	$C_0$ /mm
100/0	2.23	0.158
80/20	2.30	0.085
70/30	2.36	0.043
60/40	2.38	0.035
40/60	2.51	0.030
30/70	2.56	0.025
20/80	2.63	0.022
0/100	2.76	0.015

化胶动态疲劳性能较好。

右田哲彦<sup>[9]</sup>以  $S-N$  曲线为基础,研究了多应力条件下的疲劳累积加和法则 (Miner 法则) 对硫化胶是否适用。发现当轻缓条件 (定伸应力为拉伸强度的 20%) 加苛刻条件 (定伸应力为拉伸强度的 90%) 时, Miner 法

则成立,而苛刻条件加轻缓条件时, Miner 法则不成立。

疲劳试验数据的离散性、制品加工尺寸的偏差、硫化胶的原始缺陷,以及负载时危险部位应力响应的分布特性等,都说明应力、强度和影响它们的因素是随机变量,具有各自的分布形式。只有运用概率统计理论和方法来处理,才能正确预测橡胶的疲劳特性和产品寿命。

### 3 结语

橡胶疲劳破坏已引起人们的重视,但以往主要是研究橡胶材料的宏观疲劳性能和裂纹增长特性,并没有从本质出发探讨疲劳现象。用正确的方法来进一步研究橡胶材料的疲劳破坏机理,对于其抗疲劳破坏结构设计和疲劳寿命预测模型的建立都是极其重要的。

### 参考文献

- 1 Rivlin R *Set al.* Rupture of rubber characteristic energy for tearing. *J. Polym. Sci.*, 1953; 10(3): 291
- 2 Young D G. Application of methods based on fracture mechanics for tire compound development. *Rubb. Chem. Technol.*, 1990; 63(4): 567
- 3 Lake G J. Mechanical fatigue of rubber. *Rubb. Chem. Technol.*, 1972; 45(1): 309
- 4 Young D G. Fatigue and fracture of elastomeric material. *Rubber World*, 1991; 204(3): 30
- 5 Young D G *et al.* Fatigue crack propagation in elastomer compounds. *Rubb. Chem. Technol.*, 1982; 55(4): 428
- 6 Young D G. Dynamic property and fatigue crack propagation research on tire sidewall and model compounds. *Rubb. Chem. Technol.*, 1985; 58(4): 785
- 7 深堀美英. 弹性体の疲労寿命の予測する. *日本ゴム協会誌*, 1985; 19(10): 67
- 8 傅政等. 天然橡胶/顺丁橡胶共混物的动态疲劳与断裂特征. *橡胶工业*, 1992; 39(2): 107
- 9 右田哲彦. ゴムの疲労と疲労破壊する合成ゴム. *合成ゴム*, 1985; 83(1): 23

收稿日期 1996-11-18