

# 断裂力学方法在橡胶复合材料 疲劳研究中的应用

刘宇艳 田振辉 杜星文

(哈尔滨工业大学 150001)

**摘要** 综述断裂力学方法在橡胶复合材料中的应用现状,着重介绍了撕裂能理论在预测疲劳裂纹增长速率以及预报疲劳寿命方面的应用。

**关键词** 断裂力学,橡胶复合材料,疲劳

作为各种车辆和飞机的接地部件,轮胎在工作状态下主要承受周期变化的载荷作用,其强度和寿命主要取决于结构材料的疲劳特性。因此,研究橡胶复合材料在长期机械载荷作用下的疲劳行为,不仅可以为轮胎疲劳寿命的预报提供研究基础,而且可以为其结构的优化设计提供理论指导。

应用断裂力学方法研究橡胶复合材料的疲劳特性,是近几年来轮胎工业中非常令人关注的课题。橡胶复合材料在周期载荷的作用下,会产生疲劳裂纹,裂纹在疲劳过程中逐渐扩展,最终将导致材料破坏。断裂力学描述的就是从材料内部形成裂纹(1 mm)直至材料破坏的这一过程。它研究了裂纹的增长速率与材料性质、裂纹长度以及外加载荷的关系。由于试验结果只与材料的基本性能参数有关,因此能应用于广泛的橡胶领域和变形类型。

## 1 断裂力学基本理论

### 1.1 撕裂能的定义

Rivlin 和 Thomas<sup>[1]</sup>最早将断裂力学应用于橡胶疲劳,提出了以弹性能为基础的参数用于研究橡胶疲劳。能量法使不同几何形

状和变形的样品的裂纹增长结果发生联系,将裂纹增长和疲劳寿命定量联系起来,奠定了将实验测试和使用情况联系起来的基础。

Rivlin 和 Thomas 提出将裂纹每增长单位面积释放的能量称为撕裂能( $T$ ),数学定义式为

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

式中, $U$ 为贮存在样品中的弹性应变能, $A$ 为裂纹的一个断裂表面的面积(未应变状态),部分积分表明样品变形一定,外力不做功。

对于各种简单形状的试样,撕裂能都能计算<sup>[2]</sup>,其中一些如图1所示,对应的关系式也在图中给出。应变能密度 $W_0$ 可以通过积分试验的应力-应变曲线直接得到。

试验表明<sup>[3,4]</sup>,裂纹增长速率与撕裂能之间的关系与样品的几何尺寸无关。在周期载荷下,样品的裂纹增长速率为

$$\frac{dc}{dn} = f(T) \quad (2)$$

式中, $c$ 为裂纹长度, $n$ 为周期数, $T$ 为每周期达到的最大撕裂能。

裂纹从 $c_1$ 增长到 $c_2$ 所需的周期数,可以通过积分式(2)得到:

$$n = \frac{c_2 - c_1}{f(T)} \quad (3)$$

代入 $T$ 与 $c$ 的关系式,就可定量得到疲

作者简介 刘宇艳,女,26岁。哈尔滨工业大学复合材料研究室复合材料专业95级博士生。曾在《材料工程》等刊物发表论文5篇。

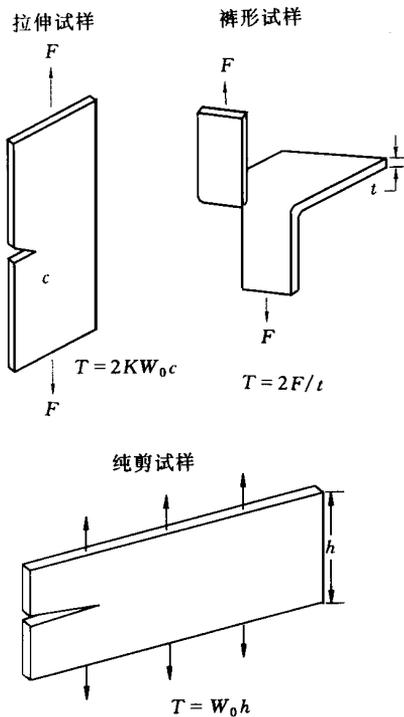


图 1 几种简单形状测试试样的撕裂能关系式  
 疲劳寿命与橡胶的裂纹增长特性、变形幅值、初始裂纹或缺陷尺寸的关系。

但事实上,用断裂力学方法研究橡胶疲劳的主要困难为:确定撕裂能、裂纹尺寸、载荷或变形间的关系。除了几种简单形状的样品外,这种关系的确定相当复杂。直接测试裂纹产生的应变能变化也受限制,因其变化太小了。

1.2 裂纹增长特性

图 2<sup>[5]</sup>和 3<sup>[6]</sup>分别为 NR 和 SBR 硫化胶的疲劳裂纹增长速率与撕裂能的关系曲线。可以看出疲劳裂纹增长特性曲线主要包括 4 个区域: 撕裂能很小时,裂纹增长速率与撕裂能无关; 当撕裂能大于  $T_0$  时,有如下关系式:

$$\frac{dc}{dn} = A(T - T_0) \tag{4}$$

$T_0$  称为疲劳极限,低于该值,裂纹在周期载荷下不扩展; 撕裂能大于  $T_a$  时,存在如下关系式:

$$\frac{dc}{dn} = BT \tag{5}$$

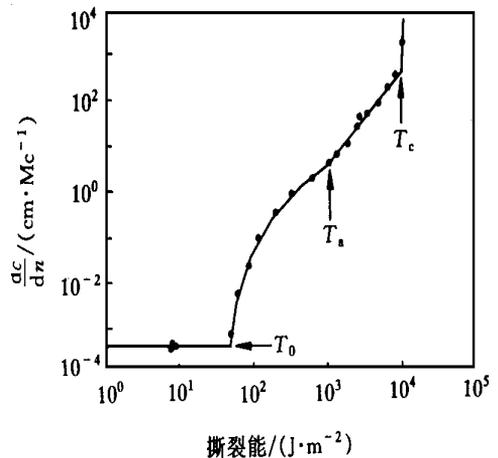


图 2 NR 的疲劳裂纹增长速率与撕裂能的关系

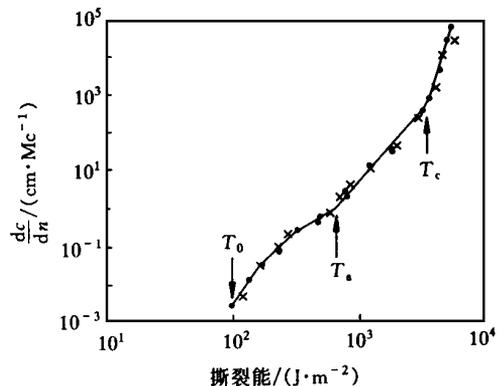


图 3 SBR 的疲劳裂纹增长速率与撕裂能的关系  
 —试样 1; ×—试样 2

撕裂能达到  $T_c$  时,有  $dc/dn = \infty$ ,断裂发生。式(4)和(5)中,  $T_0, T_a, T_c, A, B$ , 均为材料常数。

区域 对研究轮胎胎侧裂纹很重要; 对于轮胎内的疲劳破坏问题,区域 和 决定裂纹传播速度。

2 断裂力学方法在橡胶复合材料疲劳研究中的应用

断裂力学方法已证明可用于研究不包含帘线的硫化橡胶的疲劳性能<sup>[2,7,8]</sup>,但在橡胶复合材料疲劳研究中的应用才刚刚开始,下面介绍在这方面所作的一些尝试。

Breidenbach 和 Lake<sup>[9]</sup>率先将撕裂能方法推广,应用于含有两层对称排列帘线的橡胶-帘线复合材料的疲劳破坏,研究了层间裂纹的扩展情况。作者假设在两层之间存在一理想裂纹,沿试样方向裂纹的长度  $c$  一致(如图4所示),并满足以下条件:(1)裂纹前进,边缘效应随之移动;(2)裂纹足够长,以至于在边缘橡胶中的应变能基本释放为0。

按上述假定,当裂纹传播了  $c$  时,每单位长度材料的能量损失  $V$  为

$$V = W_c t c \quad (6)$$

式中,  $t$  为试样厚度,  $W_c$  为试样中心区域应变能密度。因此撕裂能近似为

$$T = \frac{V}{c} = W_c t \quad (7)$$

在各种变形周期下,试验观察到的裂纹增长速率与通过撕裂能得到的预测值符合良好,表明可以采用断裂力学方法预测两层帘线-橡胶复合材料的裂纹增长速率。

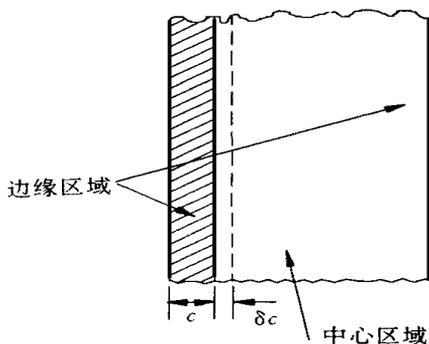


图4 含有长度为  $c$  的理想层间裂纹的层合件

Stfvenson<sup>[10]</sup>应用断裂力学方法研究了在单轴周期压缩载荷下橡胶-金属层合件的疲劳裂纹增长特性。试验观察发现,当层合件受压时,边缘橡胶凸起,裂纹从凸起部分产生;在周期压缩载荷作用下,裂纹逐渐向试样中心扩展,裂纹的增长遵从抛物线轨迹。因此撕裂能的表达式可写为

$$T = \frac{1}{2} W t \quad (8)$$

假设均匀存储的能量密度  $W$  可以用等效的线性应力-应变行为来合理代替,则有

$$T = \frac{1}{4} E_c e_c^2 t \quad (9)$$

式中,  $E_c$  为压缩时的等效弹性模量,  $e_c$  为压缩应变,  $t$  为初始未变形时橡胶层厚度。作者研究了裂纹增长速率与撕裂能  $T$  的关系,结果表明:在单轴周期压缩载荷下,可以成功地用断裂力学方法描述橡胶层合件的疲劳断裂行为。

Huang<sup>[11]</sup>采用了如图5所示的复合材料模型,这是由一组帘线整齐排列在一薄橡胶块(承受拉伸力)中而构成的帘线-橡胶复合材料模型,最高的应力集中发生在帘线埋入端处的橡胶中。

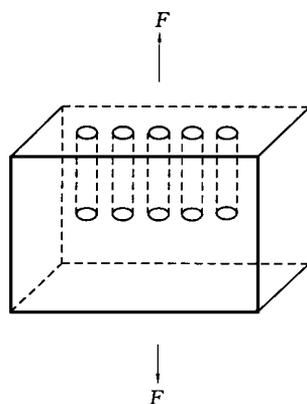


图5 由一组整齐排列的帘线埋入橡胶块内所构成的帘线-橡胶复合材料模型

假定破坏发生在帘线端部,则相应产生一排铜钱状裂纹。对于半径为  $c$  的铜钱状裂纹,能耗  $U$  可写为

$$U = kWc^3 \quad (10)$$

一个裂纹的表面积  $A$  可写为

$$A = c^2 \quad (11)$$

因此铜钱状裂纹扩展时的撕裂能  $T$  为

$$T = \frac{\partial(U)}{\partial A} = \frac{\partial(U)}{\partial c} \cdot \frac{\partial c}{\partial A} = \frac{3kWc}{2} = KWc \quad (12)$$

式中,  $k$  和  $K$  为材料常数。

对于  $T_0 < T < T_a$  范围内承受周期载荷的铜钱状裂纹, 将式 (12) 代入到式 (4) 中并积分, 可得到疲劳寿命  $N$ :

$$N = \frac{1}{A KW} \ln \frac{KWc_1 - T_0}{KWc_0 - T_0} \quad (13)$$

式中,  $c_0$  为初始裂纹的半径,  $c_1$  为破坏时的裂纹半径。

在  $T_a < T < T_c$  范围内承载的条件下, 疲劳寿命以下式表示:

$$N = \frac{1}{(A - 1) B \left( \frac{\text{能}}{KW} \right)} \left[ \frac{1}{c_0^{-1} \text{测值}_1^{-1} \text{预}} \right] \quad (14)$$

式 (13) 和 (14) 提供了预测橡胶复合材料疲劳寿命的方法, 疲劳寿命是某些参数的函数, 这些参数可由实验测定。

尽管上述研究对断裂力学方法在橡胶复合材料中的应用取得了初步进展, 但均存在不足之处: (1) 假定引起复合材料疲劳破坏的主要原因是橡胶相裂纹的增长, 而没有考虑由橡胶-帘线界面脱粘而导致的破坏; (2) 以各种理想形状的裂纹为基础进行能量分析, 与橡胶复合材料实际的疲劳裂纹存在一定的偏差; (3) 实际滚动轮胎中的橡胶复合材料处于非常复杂的应力状态, 而不仅仅是受到简单的单轴周期拉伸或压缩载荷, 因此理论研究与实际应用之间还存在一定的差距。如何克服上述不足, 建立更加准确的疲劳寿命预报模型, 则是断裂力学今后需努力的方向。

## 参考文献

- 1 Rivlin R S, Thomas A G. Rupture of rubber : characteristic energy for tearing. *Journal of Polymer Science*, 1953, 10(3) : 291 ~ 313
- 2 Young D G. Application of fatigue methods based on fracture mechanics for tire compound development. *Rubber Chemistry and Technology*, 1990, 63(4) : 567 ~ 581
- 3 Gent A N, Lindley P B, Thomas A G. Cut growth and fatigue of rubbers : the relationship between cut growth and fatigue. *Rubber Chemistry and Technology*, 1965, 38(2) : 292 ~ 313
- 4 Lake G J. Mechanical fatigue of rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 1972, 45(1) : 307 ~ 328
- 5 Lake G J, Lindley P B. Mechanical fatigue limit for rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 1966, 39(2) : 348 ~ 364
- 6 Lake G J. Fatigue of fracture of elastomers. *Rubber Chemistry and Technology*, 1995, 68(2) : 435 ~ 460
- 7 Young D G. Fatigue and fracture of elastometric materials. *Rubber World*, 1991, 204(1) : 30 ~ 34
- 8 Young D G. Dynamic property and fatigue crack propagation research on tire sidewall and model compounds. *Rubber Chemistry and Technology*, 1985, 58(4) : 785 ~ 805
- 9 Breidenbach R F, Lake G J. Mechanics of fracture in twoply laminates. *Rubber Chemistry and Technology*, 1979, 52(1) : 96 ~ 109
- 10 Stfvenson A. Fatigue crack growth in high load capacity rubber laminates. *Rubber Chemistry and Technology*, 1986, 59(2) : 208 ~ 222
- 11 Huang Y S, Yeoh O H. Crack initiation and propagation in model cord-rubber composites. *Rubber Chemistry and Technology*, 1989, 62(3) : 709 ~ 713

收稿日期 1998-02-23

## Application of Rupture Mechanism Method to Study on Fatigue Properties of Rubber Composite

Liu Yuyan, Tian Zhenhui and Du Xingwen

(Haerbin University of Technology 150001)

**Abstract** The application of the rupture mechanism method to study the fatigue properties of rubber composite was introduced focusing on the application of the tearing energy theory to predict the fatigue crack growth and the fatigue life.

**Key words** rupture mechanism, rubber composite, fatigue