

## 新技术

## 轮胎疲劳寿命研究的进展

冯希金

(三角轮胎股份有限公司, 山东 威海 264200)

## 1 前言

随着汽车工业的发展, 对作为汽车的重要部件的轮胎的性能要求越来越高。在轮胎的所有使用性能中, 其耐久性和使用寿命是轮胎工程师和轮胎使用者最为密切关注的, 人们总是希望轮胎具有较高的耐久性和较长的使用寿命。

在生产实践中, 技术人员设计好轮胎后, 为了确定其耐久性能, 通常是在轮胎耐久试验机上进行轮胎耐久疲劳试验。如果达不到国家规定标准, 则需要重新进行设计, 然后再一次进行耐久试验, 直到达到国家规定标准为止。在这个设计过程中, 往往造成新产品开发周期的延长和轮胎开发经费的提高。能否采用数值模拟的方法, 模拟轮胎的耐久疲劳试验过程, 在对轮胎进行耐久疲劳试验之前预测轮胎的耐久寿命, 从而大大减少开发试验经费和缩短新产品开发周期, 一直是轮胎工程中的一个十分重要的研究课题。

## 2 轮胎疲劳寿命的研究现状

当材料受到多次重复变化的载荷作用后, 应力值虽然没有超过材料的强度极限, 甚至比弹性极限还低的情况下, 就可能发生破坏, 这种在交变载荷作用下材料或结构的破坏现象, 就叫做疲劳破坏。材料的疲劳过程通常可以分为两个阶段: 裂纹的形成阶段和裂纹扩展阶段, 因此疲劳寿命也就由裂纹形成寿命和裂纹扩展寿命组成。

轮胎作为一种由帘线和橡胶组成的柔性复合材料结构, 具有典型的疲劳破坏现象。自轮胎诞生以来, 人们一直很重视它的疲劳寿命的研究。人们的研究方向主要有三个方面: 首先是单组分的研究, 许多人对硫化橡胶和帘线的疲劳破坏特性进行了研究; 其次是橡胶/帘线复合材料的研

究; 再次是轮胎整胎的研究。

## 2.1 单组分的研究

## 2.1.1 橡胶疲劳特性的研究

橡胶作为充气轮胎的基体材料, 可经受大的变形、良好的耐磨性和良好的气密性。由于轮胎中的各种橡胶件变形都较大, 因此, 人们对它们的疲劳特性也作了大量的研究。

## 2.1.1.1 橡胶材料在周期载荷下的粘弹性

橡胶是一种典型的粘弹性材料, 其变形不仅与当时作用的外力大小有关, 而且与环境温度、力的作用时间以及加载历史都有关系。在交变应力作用下, 出现滞后现象和力学损耗。假定粘弹性材料受到随时间正弦变化的应力:

$$\sigma = \sigma_m \sin \omega t \quad (1)$$

其中  $\sigma_m$  为最大应力,  $\sigma = 2\pi f$ ,  $f$  为频率。应变也将随时间正弦变化, 但落后于一个响应的相位角  $\delta$

$$\epsilon = \epsilon_m \sin(\omega t - \delta) \quad (2)$$

其中  $\epsilon_m$  为最大应变。

高聚物在交变应力的作用下, 形变落后于应力的现象称为滞后现象。高聚物的滞后现象与其本身的化学结构有关, 而且还受外界条件的影响。

在交变应力下, 动态模量是用最大应力和最大应变定义的:

$$E^* = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} \quad (3)$$

由于形变的变化落后于应力的变化, 发生滞后现象, 于是每一循环变化中就要消耗能量, 称为力学损耗。橡胶在每一循环过程中消耗的不可逆功:

$$W = \oint \sigma(t) d\epsilon(t) = \oint \sigma(t) \frac{d\epsilon(t)}{dt} dt \quad (4)$$

将式(1)、(2)代入上式,可得:

$$W = \sigma_m \epsilon_m \int_0^{2\pi/\omega} \sin \omega t \cos(\omega t - \delta) dt \quad (5)$$

积分得:

$$W = \pi \sigma_m \epsilon_m \sin \delta \quad (6)$$

此能量是造成轮胎温度升高,进而导致材料破坏的主要原因。

在周期载荷条件下,橡胶材料的粘弹性对其疲劳损伤的影响是不容忽视的。

### 2.1.1.2 橡胶疲劳机理的研究

对于橡胶材料的疲劳破坏机理,有一些研究者应用电子显微镜(SEM)技术进行了探索。Bartenev应用SEM技术分别研究了橡胶试件静态拉伸破坏和动态疲劳破坏的断口,发现在静态破坏中,链的断裂是物理过程,而疲劳破坏则是物理和化学相结合的过程。

### 2.1.1.3 裂纹形成寿命的研究

对于橡胶材料的裂纹形成寿命,目前相关的文献报道很少,从目前可以查到的文献来看,Breidenbach、Lake、Y. S. Huang、O. H. Yeoh的研究认为,橡胶材料的裂纹形成寿命与其裂纹扩展寿命相比很小,可以忽略。

### 2.1.1.4 断裂力学方法在橡胶疲劳研究中的应用

在橡胶疲劳问题的研究中,几乎所有的文献都是以断裂力学为基础的方法进行的。Rivlin和Thoms最早将断裂力学应用于橡胶的疲劳,他们提出了以应变能释放率(撕裂能)为基础的方法研究橡胶的疲劳。

G. J. Lake系统地研究了橡胶材料的疲劳断裂问题,提出了能量法,定义裂纹每扩展单位面积所吸收的能量为应变能释放率:

$$G = - \frac{\partial U}{\partial A} \quad (7)$$

其中:U为贮存在试件中的总弹性应变能,A为裂纹的一个断裂表面的面积。他指出裂纹尖端的应变能释放率G的具体表达式为:

$$G = 2K W_t c_t \quad (8)$$

其中K为材料常数,W<sub>t</sub>为裂纹尖端的应变能密度,c<sub>t</sub>为裂纹尖端的有效直径。在中等应变能释放率范围内,橡胶材料的裂纹扩展遵循指数率:

$$\frac{dc}{dn} = B G^\beta \quad (9)$$

其中B和β是材料常数。将式(8)代入式(9)并对式(9)积分得到裂纹从长度c<sub>1</sub>扩展到c<sub>2</sub>的扩展寿命为:

$$n = \frac{1}{(\beta-1)B(2KW)^\beta} \left[ \frac{1}{c_1^{\beta-1}} - \frac{1}{c_2^{\beta-1}} \right] \quad (10)$$

Ebot详细研究了两种橡胶材料在不同温度下的裂纹扩展情况,给出了两种材料在两种不同温度下的裂纹扩展常数。

Lake应用裂纹张开技术估算斜交胎的花纹沟裂纹的应变能释放率,分析了卡车斜交胎的花纹沟裂纹扩展速度。

Grosch先后研究了斜交轮胎的胎面花纹沟和子午线轮胎的胎侧的动态应变,探讨了动态应变对裂纹扩展特性的影响。实验表明,花纹沟裂纹(斜交轮胎)和胎侧裂纹(子午线轮胎)受胶料切口扩展参数和撕裂能的控制。

1985年,Young采用液压伺服系统测试纯剪切试件,得到了精确的应变能密度W<sub>0</sub>和疲劳裂纹扩展(FCG)数据,用于研究子午线轮胎的胎侧裂纹。

断裂力学方法在橡胶疲劳研究中的应用大大地促进了橡胶疲劳寿命的研究,为研究整胎的疲劳寿命打下了基础。

### 2.1.2 帘线的疲劳特性研究

轮胎帘线的抗疲劳性能已研究了多年,因为它对轮胎性能有重要的影响,但是该性能却很难评价。关于轮胎帘线的抗疲劳性能的文章很多,一些是研究帘线在室温下的拉伸、双轴转动、弯曲的疲劳现象,还有一些对实际轮胎中承受的周期压缩和弯曲的帘线进行了疲劳研究。

近年来,子午线轮胎的出现,人们对钢丝帘线的疲劳性能也开始了研究。Prakash确定了影响钢丝帘线寿命的各种因素并用实验技术对其进行了估计,结果表明:赫兹接触应力是产生微震磨损和疲劳破坏的主要因素。疲劳寿命依赖于钢丝的直径(弯曲应力)、滞后损失(钢丝间的摩擦力)和负荷的平均应力。Pokluda研究了不同的钢丝帘线在旋转屈挠实验机上的实验室,实验表明,帘线的疲劳强度不仅取决于帘线的结构,而且取决于钢丝的疲劳强度。

### 2.2 橡胶复合材料疲劳特性的研究

除了具有一般复合材料的不均匀性和各向异

性外,橡胶复合材料还具有特殊的力学性能。例如,它与树脂基复合材料相比,二者的力学性能有明显的不同,如表 1 所示:

表 1 树脂基复合材料与橡胶基复合材料的力学性能的对比

力学性能	树脂基复合材料	橡胶基复合材料
拉伸 $\sigma-\epsilon$	线性	非线性
压缩 $\sigma-\epsilon$	线性	非线性
剪切 $\tau-\gamma$	非线性	线性

而且橡胶基复合材料大多数在大变形条件下工作,具有低刚度和高弹性的使用特性,循环交变载荷下还具有不可忽视的粘弹滞后性能。其疲劳行为的研究具有很多理论和测试手段上的困难,以至到目前为止,人们对橡胶复合材料的疲劳研究较少,仅有几篇文章涉及到其疲劳特性的研究。

### 2.2.1 橡胶与帘线的界面疲劳性能研究

W. James 和 Lyons 研究了不同的浸液对帘线和橡胶的界面疲劳特性的影响。

Watanabe 和 Takata 研究了 PET 帘线在橡胶中的疲劳机理发现,如果帘线和橡胶间的界面粘接强度比较大,则疲劳裂纹发生在橡胶一侧,否则裂纹发生在纤维一侧,使纤维发生断裂。

### 2.2.2 以断裂力学为基础的方法研究橡胶复合材料的疲劳

断裂力学方法已广泛用于研究硫化橡胶的疲劳性能,但它在帘线/橡胶复合材料的研究中的应用才刚刚开始,下面介绍在这方面的研究进展。

Breidenbach 和 Lake 率先将能量法应用于含有两层对称排列帘线的帘线/橡胶复合材料的疲劳破坏,研究了层间裂纹的扩展机理。他们采用的是帘线露出端头的复合材料模型,在 MTS 实验机上,以 1.5Hz 的频率反复施加幅值在 3%~5% 的拉应变。研究发现,层合物中心区域的应变是裂纹扩展的主要原因,而不是边缘的剪应变,尽管它对裂纹的形成起很大作用。

Stfvenson 应用断裂力学方法研究了在单轴周期载荷下金属/橡胶层合件的疲劳裂纹扩展特性,实验观察发现: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,裂纹逐渐向试件中心扩展,裂纹的扩展遵从抛物线轨迹。作者研究了裂纹扩展速率与撕裂能  $T$

的关系,结果表明,在单轴周期载荷下,可以成功地用断裂力学的方法描述橡胶层合件的疲劳断裂行为。

Huang 则采用帘线完全被橡胶包覆的复合材料模型,研究了帘线端头裂纹的产生过程。他效仿了 Breidenbach 和 Lake 所采用的方法,将撕裂能方法推广应用于研究帘线/橡胶复合材料的疲劳破坏。研究表明,材料疲劳破坏的机理是: a. 由于高应力集中于帘线的端部,使这个部位的橡胶产生铜钱状的裂纹; b. 这些裂纹的扩展方式与人们根据龟裂扩展特性(可由纯剪切测出)所作的预测是一致的; c. 这些裂纹汇合成线状裂纹,线状裂纹再发展成层间裂纹; d. 层间裂纹再以与该材料龟裂扩展特性相一致的方式扩展,直至大量脱层导致材料破坏。利用撕裂能  $T$  是裂纹长度  $c$  的函数和龟裂扩展特性的适当关系,在合适的范围内对  $\frac{dc}{dn} = f(T)$  积分,可以计算出复合材料的疲劳寿命。文中对两种复合材料的模型进行了能量分析,与橡胶复合材料实际的疲劳裂纹存在一定的偏差。

### 2.2.3 以疲劳寿命图(即 S-N 曲线)的方法研究橡胶复合材料的疲劳

S-N 曲线在金属的疲劳研究中得到了广泛的应用,但在橡胶材料中的应用较少。这是因为对橡胶制品,其疲劳寿命一般高达  $10^6 \sim 10^8$  次,为得到一点的数据,需要相当长的时间。

哈工大万志敏和杜星文以人造丝增强橡胶复合材料为研究对象,研究了单向帘线/橡胶复合材料的疲劳寿命图。从图中可以看到,材料的疲劳损伤过程呈现两个不同的阶段:稳态损伤阶段和加速损伤与断裂过程。利用三参数幂函数对图中的曲线进行拟合,得到稳态疲劳寿命(即疲劳寿命),对应方程为:

$$e_d = 13 \left[ 1 + \frac{134}{N_b^{0.17}} \right] \quad (11)$$

根据该方程即可预测给定应变幅值的人造丝帘线增强橡胶复合材料的疲劳寿命。在实验范围内,理论值与实验值符合很好。

田振辉研究了聚酯帘线/橡胶复合材料的疲劳特性和损伤机理,指出最大应变对聚酯帘线/橡胶复合材料的疲劳性能影响最为明显,三种不同

的疲劳机理为:帘线/橡胶界面脱粘、帘线断裂和纵向剪切破坏。

Lee 和 Liu 采用尼龙纤维增强橡胶复合材料来模拟航空斜交轮胎的胎体,评价了试件尺寸、频率及波形对疲劳寿命的影响。研究表明:长宽比对疲劳寿命影响不大,而周期频率却大大影响试件的疲劳寿命。高周期频率将导致疲劳寿命缩短,疲劳极限降低。另外,作者还以双轴应力实验为基础,研究了载荷序列对复合材料的疲劳损伤累积过程的影响,提出了以动态蠕变为基础的线性累积损伤模型。但该文仅仅对疲劳寿命的影响因素进行了分析,而未从疲劳本质和机理进行详细的探讨。

2.2.4 用损伤力学的观点研究橡胶复合材料的

$$\frac{1}{N_f} = (0.1B+1) \cdot M \frac{[(\sigma_0 + \sigma^*)^{2B} - (\sigma_0 - \sigma^*)^{2B}]}{(P+Qlgf)^B \sigma_0^B} \quad (12)$$

利用上式,只要测得材料的力学常数 P、Q、M、B,即可计算出给定的应力幅值  $\sigma^*$  和平均应力  $\sigma_0$  下材料的疲劳寿命。

本模型首次将不可逆热力学和损伤力学应用于橡胶复合材料疲劳的研究,选择循环模量作为损伤变量,建立了橡胶复合材料的疲劳寿命预报方程。

2.3 整胎的研究

整胎的耐久性能的研究是以单组份材料的研究和复合材料的研究为基础的。整胎的疲劳耐久性取决于轮胎某一组件产生的破坏及这种破坏的发展情况。对于整胎的研究,一般以经验公式为依据或以更科学的破坏标准为依据,将在苛刻负荷下的破坏和正常负荷下的里程建立联系。

Grosch 从轮胎的滚动阻力角度,基于 Rivlin 与 Thomas 的切痕扩展理论,研究了承载条件、充气压力和生热率对轮胎中疲劳裂纹扩展的影响,提出了有争议的含能量密度的疲劳寿命方程。

Bobo 对航空斜交轮胎在远程、中程、短程使用条件下的寿命进行了测试,提出航空斜交轮胎的使用极限以层间粘合力下降 50% 为寿命终点,研究认为,高的生热率和循环滚动应力是导致轮

$$N_{a-\alpha_c} = \int_{a_d}^{\alpha_c} dN = \int_{a_d}^{\alpha_c} \frac{da}{C(\Delta G)^\alpha} = \sum_{a_d}^{\alpha_c} (\alpha - \alpha_{-1}) \frac{1}{C(\Delta G(\alpha))^\alpha} \quad (14)$$

上式中 C、 $\alpha$  为材料常数,可以通过实验测得。利用上式,用有限元方法计算出裂纹在每步

疲劳

哈工大刘宇艳博士利用损伤力学的方法研究了聚酯帘线/橡胶复合材料及尼龙帘线/橡胶复合材料的疲劳行为,考虑了加载频率、平均应力、应力幅值及疲劳过程中的生热对疲劳寿命的影响。指出橡胶复合材料的疲劳破坏机制可分为两类:第一类是由于交变应力产生的,基体裂纹的扩展、纤维-基体界面脱粘以及帘线断裂导致疲劳破坏;第二类则是由于温度生高而导致的组分材料性能的劣化,不可逆的组分材料结构损伤和化学降解形成的。

运用连续介质损伤力学和不可逆热力学的理论,经过一系列公式推导,建立了帘线/橡胶复合材料的疲劳损伤模型:

胎疲劳破坏的主要因素,同时讨论了速度、侧向力等因素的影响。

J. De. Eskinazi 利用有限元方法对带束层端部的应力分析参数进行了研究,指出可以利用带束层的周向最大剪切应变、等价应力和等价应变、应变能密度来衡量带束层耐久性能的好坏。

加部和幸、下村严研究了全钢载重胎的负荷 W、速度以及轮胎温度 T 之间的关系:

$$T = A(W \cdot S) + B \quad (13)$$

其中 A 和 B 是与轮胎规格、花纹等有关常数。日本汽车轮胎协会在大量实验的基础上提出了轮胎安全临界温度的概念,并确定载重胎的安全临界温度为 125℃,这样从侧面给出了轮胎寿命与载荷和速度的关系。

哈工大危银涛博士采用虚拟裂纹闭合技术 (VCCT) 对轮胎带束层脱层问题进行了卓有成效的研究,最后给出了数值计算结果,并对胎肩的脱层耐久性能进行了预报。

从断裂力学的观点出发,利用应变能释放率的概念,经过一系列公式推导,得出裂纹的长度从  $\alpha_d$  扩展到  $\alpha_c$  的扩展寿命为:

的能量释放率  $\Delta G$ ,即可计算出裂纹的扩展寿命。

VCCT 方法是模拟裂纹扩展的一个较好的

方法,但它不能用于分析裂纹的形成寿命。需指出的是扩展寿命与所确定的裂纹可检测长度及临界长度有关,目前这两个长度国外都有相关的经验值。

笔者在危银涛博士工作的基础上,进一步开展了轮胎在转鼓试验条件下的脱层疲劳寿命的预报研究。在试验的基础上,对各种规格的子午线轮胎的脱层破坏现象进行了分析研究,总结了不同用途的轮胎的脱层破坏规律,并对轮胎最终破坏后的裂纹长度进行了统计分析,对轮胎脱层破坏规律的研究使得轮胎疲劳寿命分析的目的更加明确,针对不同用途的轮胎可以重点研究轮胎不同部位的疲劳性能;对裂纹长度的统计分析使得疲劳破坏判据得以明确。而这两点是进行轮胎疲劳寿命预报的前提。

最后在危银涛博士的相关软件的基础上,笔者作了进一步的补充完善,增加了轮胎在转鼓上滚动的数值仿真模块,并对虚拟裂纹闭合技术(VCCT技术)进行了进一步的发展,提出了裂纹生长过程中的混合扩展模式,该混合扩展模式改变了过去人们常用的一个微小裂纹将沿裂纹的两个尖端双向等比例扩展的假设,指出裂纹到底向那一方向扩展完全取决于裂纹两个尖端的应变能释放率的大小,裂纹是沿应变能释放率大的方向扩展的。由于混合扩展模式考虑了裂纹的左右尖端的应变能释放率的不同对裂纹扩展的长度所造成的影响,因此利用混合扩展模式可以更加真实地模拟轮胎脱层的裂纹扩展过程,使脱层裂纹扩展寿命预报更加准确。利用其所提供的方法和软件,可以初步对子午线轮胎的转鼓耐久性实验进

行模拟,可以初步预报轮胎的疲劳寿命,尤其在多方案的对比优化方面它将可以发挥较大作用。

### 3 轮胎疲劳寿命研究展望

由于轮胎的疲劳寿命受到诸多因素的影响,比如温度、材料的力学和热学性能等,要想更准确地进行轮胎的疲劳寿命的预报,还有大量工作要做,主要有如下几个方面:

1. 裂纹形成寿命的研究。从目前的国内外文献来看,有关橡胶材料的裂纹形成寿命的报道很少,有人认为橡胶材料的裂纹形成寿命与其扩展寿命相比很短,可以忽略不记,或许这是一种无奈之举。或许需要用损伤力学的方法,通过进行大量的实验来研究橡胶材料的裂纹形成寿命。橡胶材料的裂纹形成寿命知道了,则轮胎脱层的裂纹形成寿命也就容易解决了。

2. 温度对耐久疲劳性能的影响。众所周知,轮胎在滚动过程中将产生大量的热量使轮胎内部温度升高,而橡胶材料的一个显著特点就是其力学性能与温度紧密相关,我们需要研究橡胶材料的力学性能的温度依赖性,比如其模量、粘接强度、撕裂能等性能与温度的关系,从而进一步揭示温度对耐久疲劳性能的影响。

3. 橡胶材料的裂纹扩展特性的研究。该研究由于需要特别精密的实验设备而使实验难度增加。通过该实验研究,应能测定出不同温度下的橡胶材料的裂纹扩展常数  $C$  和为进行不同温度下的脱层分析打下基础。

参考文献:略

## RCD-II 型

# 橡 胶 炭 黑 分 散 度 测 定 仪

北京万汇一方科技发展有限公司 橡胶技术部

电话: 010-68049822 68040705

传真: 010-68016773

E-mail: info@rubberinfo.com.cn