

深入式滞后测试仪在橡胶材料上的应用

于国君 花清国 陈 丽 王友善

(桦林轮胎股份有限公司 157032)

摘要 对橡胶复合材料在交变力下的损失特性,即内耗问题进行了研究,首次将深入式滞后测试仪应用于轮胎材料的损失特性测试中。分别对子午线轮胎和斜交轮胎各部位橡胶及帘线-橡胶复合材料的损失特性进行了测试。计算结果表明,用深入式滞后测试仪与目前普遍使用的自由振动法得到的结果有较好的一致性。

本方法可对轮胎滚动阻力分析、温度场分析、温度场与应力、应变场耦合等问题的研究提供依据。

关键词 橡胶复合材料, 损失特性, 损耗因子

损失特性也称为损耗特性,是一种动态生热特性,其实质是热特性中的一种。橡胶复合材料作为一种结构材料,在实际应用时往往受到交变力(应力大小呈周期变化)的作用。如轮胎、输送带、齿轮等,都是在交变力作用下使用的,对滞后损失的研究和测量主要是针对材料的动态刚度和阻尼的测量。

对橡胶复合材料的动态测量,不仅可用于材料的热生成率的计算,而且可用于无损鉴定和疲劳的研究。这样,对复合材料损失特性的分析与试验的描述变得更加重要了。虽然过去在试验技术方面已做了很大努力,但是电子工业的发展加速了在控制和分离影响这些试验可靠性的参数方面的研究。以往的试验依赖于模拟式电子仪器;现在的试验联合使用模拟式与数字式电子仪器;将来的试验可能完全改成数字式电子仪器。

动态试验方法包括自由振动、共振受迫振动、非共振受迫振动以及波或脉冲传导技术等,每种方法适用的频率有一定的范围。

自由振动试验类型有回弹试验、杨子尼(Yerzley)机械示波器试验、扭摆试验等等,其试验特点是简单、实用,尤其在工程中的应用比较广泛,但是由于受试样尺寸、放置条件、调节情况以及空气阻力等影响,精度不够高,而且对许多的细节都必须按规定一丝不苟地执行,否则将引起无法考察原因的误差。

共振受迫振动法理论上比较成熟,而且由于采用了新的电子线路、改进的转换器、信号接

收系统以及计算机控制系统,使得高分子材料动态性能测试有了巨大的发展。

对于非共振受迫振动法,按其结构不同可分为机械式、光电或电子式、电磁式、油压式等。此类方法试验精度比较高,且测试时间较短。

从理论上讲,如果考虑到测试的全部因素,如温度、频率、振幅、试样形状等,各种试验机或试验方法所得到的结果是可以比较的。本研究用深入式滞后测试仪测量橡胶及其复合材料的动态性能(阻尼系数、动态弹性模量),从而计算橡胶及其复合材料的损耗因子及损耗模量。该仪器属共振受迫振动类仪器,是我国唯一的一台深入式滞后测试仪。

1 损失特性试验原理及力学模型

橡胶复合材料在交变力作用下,应力和应变都是时间的函数。这时弹性模量应为复模量。当 $\epsilon(t) = \epsilon_0 \sin t$ 时,因应力变化比应变领先一个相位角 δ 故

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta)$$

其展开式为

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin \omega t \cos \delta + \sigma_0 \cos \omega t \sin \delta \tag{1}$$

令

$$E' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cos \delta \tag{2}$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \sin \delta \tag{3}$$

则应力表达式变成

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \epsilon_0 E' \sin \omega t + \epsilon_0 E'' \cos \omega t \\ \tan \delta &= \frac{E''}{E'} \end{aligned} \tag{4}$$

E' 与 E'' 分别为材料的存储模量和损耗模量,

作者简介 于国君,男,33岁。工程师。1989年毕业于大庆石油化工学院化机专业。主要从事工艺装备设计工作。

$\tan \delta$ 为损耗角正切,即损耗因子。这里,我们选用 Voigt (或 Kelvin)模型,模型的运动方程为

$$\sigma = E\epsilon + \eta \frac{d\epsilon}{dt} \tag{5}$$

材料在交变应力作用下有

$$\sigma = \epsilon_0(E \sin \omega t + \omega \eta \cos \omega t) \tag{6}$$

这样可得

$$E'' = \omega \eta \tag{7}$$

$$\tan \delta = \frac{\omega}{E'} \eta \tag{8}$$

2 深入式滞后测试仪的实验原理

试验采用意大利倍耐力轮胎公司制造的 HYSTERESZMETERZS102 型深入式滞后测试仪,该仪器是用来测定硫化胶料及橡胶复合材料的粘弹性参数的,即测量滞后性能和动态刚性。仪器包括滞后测试仪、电子控制系统、微型数字处理系统和打印机、可调温的恒温浴、仪器鉴定装置等。该仪器的基本组成部分是一个质量为 76 g 的振动杆(见图 1),杆的一端有一个邵尔 A 型平压头,压头落在被测试样的表面上,这个杆装有两个小型永久磁铁。

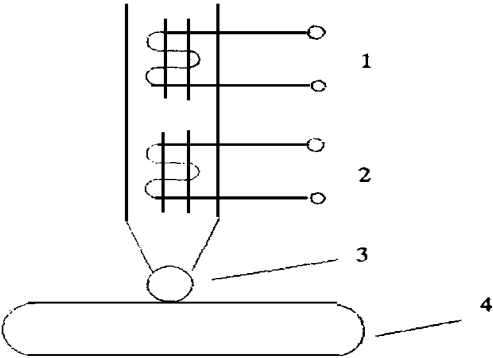


图 1 振动杆工作原理

1—测频率; 2—测电压; 3—压头; 4—试样

试验是通过底部线圈垂直地对试样进行电磁振动,并且与一个矩形信号发生器相联。该信号发生器与顶部探测线圈发生的正弦信号同步。仪器本身稳定的频率是共振频率,用这个频率测定试样的动态性能,或者说试验是将带有测量传感器的振动棒压向试样后进行电磁振动。通过系统的共振频率和测试平台上的张力诱导,把试片的动态滞性及弹性常数分别表示出来。共振频率的变化情况如图 2 所示。

强迫共振试验中,运动方程可写为

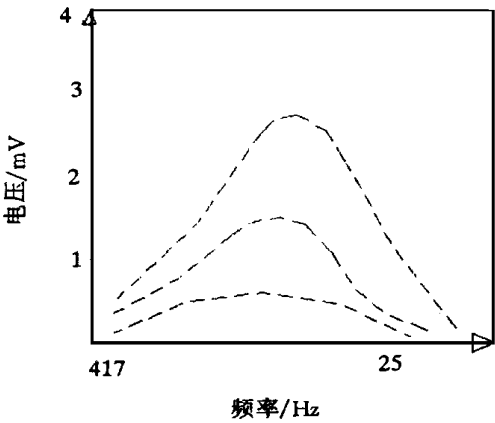


图 2 共振频率曲线变化情况

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = \sqrt{2}F \sin \Omega t \tag{9}$$

式中 m ——运动系统质量;

x ——试样的变形;

$\frac{d^2x}{dt^2}$ ——试样变形加速度;

r ——阻尼系数;

F ——正弦力的有效值;

Ω ——脉冲角频率。

我们规定

$$Q = \sqrt{2}F$$

$$k = \omega_R^2 m$$

从式(9)中我们可以得到瞬时位移 x :

$$x(r) = \frac{Q}{\sqrt{(\omega_R^2 - \Omega^2)^2 + \frac{r^2}{m^2} \Omega^2}} \sin(\Omega t - \arctan \frac{r}{m} \cdot \frac{\Omega}{\omega_R^2 - \Omega^2}) \tag{10}$$

由式(10)可以求得任意时刻的速度 $\dot{x}$:

$$\dot{x} = \frac{\Omega \cdot Q/m}{\sqrt{(\omega_R^2 - \Omega^2)^2 + \frac{r^2}{m^2} \Omega^2}} \cos(\Omega t - \arctan \frac{r}{m} \cdot \frac{\Omega}{\omega_R^2 - \Omega^2}) \tag{11}$$

当 $\dot{x}$ 最大时,有 $\cos(x)=1$ 。由式(11)可得 $\dot{x}$ 的最大值:

$$\dot{x}_{\max} = \frac{Q/m}{\sqrt{\frac{(\omega_R^2 - \Omega^2)^2}{\Omega^2} + \frac{r^2}{m^2}}} \tag{12}$$
$$Q = r \dot{x}_R$$

其中 r 是单位速度时所受的阻力。

若令

$$A = \frac{x_{\max}}{x_R}$$

那么

$$x_{\max} = Ax_R = A \frac{Q}{r}$$

式中 $x_{\max}$ ——带有脉冲 Ω 的最大速度；

x_R ——带有脉冲 ω_R 的最大速度。

这样，式(12)可写成

$$A \frac{Q}{r} = \frac{Q/m}{\sqrt{\frac{(\omega_R^2 - \Omega^2)^2}{\Omega^2} + \frac{r^2}{m^2}}}$$

整理得

$$\frac{(\omega_R^2 - \Omega^2)^2}{\Omega^2} = \left(\frac{1}{A^2} - 1\right) \frac{r^2}{m^2}$$

若令 $H = \sqrt{\frac{1}{A^2} - 1}$ ，则有

$$\frac{\omega_R^2 - \Omega^2}{\Omega} = H \frac{r}{m} \tag{13}$$

或

$$\frac{\Omega^2 - \omega_R^2}{\Omega} = H \frac{r}{m} \tag{14}$$

现在我们得到两个相同 $x_{\max}$ 的脉冲 Ω_1 和 Ω_2 ，或者说由式(13)和(14)可知：

$$\begin{aligned} \omega_R^2 - \Omega_1^2 &= \Omega_1 H \frac{r}{m} \\ -\omega_R^2 + \Omega_2^2 &= \Omega_2 H \frac{r}{m} \end{aligned}$$

整理得

$$r = \frac{(\Omega_2 - \Omega_1)m}{H} = \frac{(\Omega_2 - \Omega_1)m}{\sqrt{\frac{1}{A^2} - 1}} \tag{15}$$

由此我们可以求得粘性阻尼系数 r ， r 表示单位速度时所受的阻力，单位为 $N \cdot s \cdot m^{-1}$ 。弹性常数 k 不能由 $k = \omega_R^2 m$ 直接计算，因为 ω_R 测量比较困难，而且将得到不同的值，这样我们由最大速度相同的脉冲 Ω_1 和 Ω_2 来计算。

$$\begin{aligned} \frac{Q/m}{\sqrt{\frac{(\omega_R^2 - \Omega_1^2)^2}{\Omega_1^2} + \frac{r^2}{m^2}}} &= \frac{Q/m}{\sqrt{\frac{(\omega_R^2 - \Omega_2^2)^2}{\Omega_2^2} + \frac{r^2}{m^2}}} \\ \omega_R^4 &= \frac{\Omega_1^2 \Omega_2^4 - \Omega_2^2 \Omega_1^4}{\Omega_2^2 - \Omega_1^2} \end{aligned}$$

$$\omega_R = \sqrt{\Omega_1 \Omega_2}$$

这样我们可以利用 $k = \omega_R^2 m$ 来计算弹性

常数了，即

$$k = (\sqrt{\Omega_1 \Omega_2})^2 \cdot m = \Omega_1 \Omega_2 m \tag{16}$$

对于简单的线性方程，由 Kelvin 模型可知， $k = \omega r$ 是适用的。

总之，因为橡胶复合材料的动态力学性能比单独的简单的 Kelvin 粘弹体更复杂，试验得到的参数，不仅与温度有关，而且与应力的频率、振幅也都相关。

图 3 说明由数字滞后测试仪存储的共振曲线提供振动频率的方法。

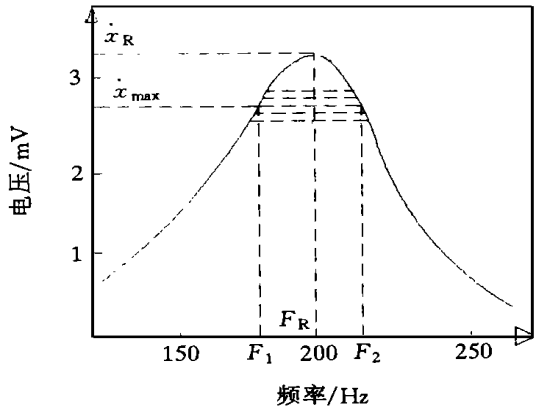


图 3 共振曲线提供振动频率的方法

$$\Omega = 2\pi F$$

$$A = \frac{x_{\max}}{x_R}$$

$$\omega_R = \sqrt{\Omega_1 \Omega_2} = 2\pi \sqrt{F_1 F_2}$$

从此式可以计算每一条曲线的 r 值和 k 值：

$$\begin{aligned} r &= \frac{(\Omega_2 - \Omega_1)m}{\frac{1}{A^2} - 1} = \frac{2\pi(F_2 - F_1)m}{\frac{1}{A^2} - 1} \\ k &= \omega_R^2 m = 4\pi^2 m F_1 F_2 \end{aligned}$$

$x_{\max}$ 是 x_R 的有效值。有：

$$r = 2\pi(F_2 - F_1)m \tag{17}$$

然后 r 和 k 的平均值将被计算出来，储存在存储器中，被打印出来。

3 试验结果分析

表 1 是某一试验所测子午线轮胎和斜交轮胎各部件的试验结果。

表 1 中 $\bar{r}$ 是粘性系数 10 次测得值的平均值， k 是动态弹性常数 10 次测得值的平均值。

表 1 试验结果				
部 件	$r/$ ($\text{N}^{\circ}\text{s}^{\circ}\text{m}^{-1}$)	$k/$ ($\text{kN}^{\circ}\text{m}^{-1}$)	$\tan \delta$	$E''/$ MPa
子午线轮胎				
内衬层	17.84	14.44	0.17	2.548
三角胶	15.93	75.10	0.067	5.008
胎侧胶	8.62	12.07	0.09	1.087
粘合胶	9.20	30.50	0.06	1.843
胎面胶	8.93	13.15	0.132	1.175
胎体胶	10.39	43.38	0.057	2.482
ALT	6.91	14.92	0.065	0.969
ACK	10.64	24.06	0.079	1.893
斜交轮胎				
070 胶	3.77	5.53	0.058	0.322
080 胶	4.66	7.19	0.063	0.453
缓冲层	7.96	13.83	0.078	1.074
090 胶	3.73	7.81	0.048	0.378

由前面我们可知, r 即是阻尼系数, k 即是弹性模量 E' , 这样, 由

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'}$$
$$E'' = \omega \eta$$

即

$$k = E = \omega_R^2 m$$

我们可得

$$E = \eta \sqrt{\frac{E}{m}} = r \sqrt{\frac{k}{m}}$$
$$\tan \delta = \eta \sqrt{\frac{1}{Em}} = r \frac{1}{\sqrt{km}}$$

由此可求出不同试件的损耗模量 E'' 和损耗因子 $\tan \delta$ 。这里, 应注意单位的统一, r 的单位是 $\text{N}^{\circ}\text{s}^{\circ}\text{m}^{-1}$, 要换算成 $\text{kN}^{\circ}\text{s}^{\circ}\text{m}^{-1}$; m 是 0.076 kg, 近似等于 $0.076 \times 10^{-2} \text{ kN}$ 。

把深入式滞后测试仪测得的部分橡胶和帘线-橡胶复合材料试件的 $\tan \delta$ 值与自由振动法测得的 $\tan \delta$ 值进行比较 (见表 2), 可知二者较为一致。

表 2 深入式滞后测试仪测得的 $\tan \delta$ 值与自由振动法测得的 $\tan \delta$ 值的比较		
部 件	自由振动法	深入式滞后测试仪
070 胶	0.056 8	0.058
ALT	0.072 6	0.065
080 胶	0.060 8	0.063
缓冲层	0.087 8	0.078
090 胶	0.048 1	0.048
ACK	0.070 6	0.079

4 结 语

由以上分析可以看出, 深入式滞后测试仪对橡胶复合材料损失特性的测试是比较合理的, 而且该仪器是数字式, 其自动化程度比较高。本工作大大加快和简化了对橡胶复合材料损失特性的研究, 从而为温度场分析、轮胎滚动阻力分析等问题提供了依据。

收稿日期 1998-11-20

镇江开发出全地形可更换型橡胶履带

江苏省镇江环流橡胶有限责任公司(原镇江橡胶厂)开发成功的全地形可更换型橡胶履带投入批量生产, 可年产各类规格可更换型橡胶履带 1 万条。

该产品是在普通型橡胶履带和钢质履带基础上开发的, 具有受力均匀, 不破坏地面, 可在各种地形或作业场所使用, 能与钢质履带和普通橡胶履带直接互换使用等特点, 可用于工程机械、农林机械、军事装备等。

这种全地形可更换型橡胶履带经国内外厂家实际使用, 反映良好, 质量达到国外 90 年代同类产品先进水平。

(摘自《中国化工报》, 1999-03-01)

新型胶片冷却装置开发成功

天津橡塑机械联合有限公司开发成功新型胶片冷却装置。该装置为“国家重大引进消化吸收项目”计划内容之一。经 3 年多时间实际运行证明, 该装置连续工作性能稳定可靠, 胶片冷却效果好, 操作和维护方便, 功能齐全, 能满足生产工艺要求, 安全设施灵敏可靠, 噪声小, 达到了国际先进的技术条件, 是密炼机生产线的理想配套设备。装置设计合理、先进, 电器装置和控制系统性能稳定可靠, 自动化程度高, 对提高生产率和经济效益起到了保证作用。该装置整体水平达到了 90 年代国外同类设备先进水平, 居国内领先水平, 可以替代进口产品。

(摘自《中国化工报》, 1999-03-04)