

橡胶剪切静动态特性试验及建模分析

赵旭¹, 魏玉明¹, 上官文斌^{1,2*}, 荣俊伟², 刘玉姝³

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641; 2. 宁波拓普集团股份有限公司, 浙江 宁波 315800;

3. 宁波永发集团有限公司, 浙江 宁波 315800)

摘要: 设计了橡胶剪切试验夹具和试验方法, 测试橡胶在不同压缩比下的剪切静动态特性。提出一种橡胶剪切模型: 剪切应力由弹性应力、粘性应力和摩擦应力叠加, 其中粘性应力表征橡胶的频率相关性, 摩擦应力表征橡胶的振幅相关性。弹性应力模型和摩擦应力模型参数由准静态剪切试验识别, 粘性应力模型参数由动态剪切试验识别, 并通过曲线拟合得到各模型参数随橡胶压缩比变化的函数关系。

关键词: 橡胶; 静动态剪切试验; 压缩比; 剪切模型; 参数识别

中图分类号: TQ330.7 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-890X(2015)03-0178-05

橡胶材料具有刚度可调、耐久性能好、性能稳定等优点^[1], 在汽车工业中应用广泛。橡胶属于粘弹性材料, 其动态特性与激振频率相关。由于加入了炭黑补强填充剂, 橡胶表现出类似干摩擦现象的特征, 其动态特性随激振振幅而变化。因此, 对橡胶材料静动态特性进行试验和建模, 研究模型参数随橡胶压缩比的变化规律, 对橡胶在振动与噪声控制方面的应用具有重要意义。

最简单、使用最广泛的橡胶力学模型为线性弹簧和线性阻尼器并联而成的 Kelvin-Voigt 模型^[2], 但该模型无法表征橡胶的幅值相关性, 而且表征频率相关性时误差较大。T. Pritz^[3]提出四参数分数导数模型, 并详细讨论了各个参数对损失系数和损失模量的影响。T. Yajima 等^[4]提出广义的分数导数 Maxwell 模型, 并进行数学求解。潘孝勇等^[5]采用模型叠加方法, 建立了用于计算的橡胶隔震器动态特性的弹性-粘弹性-弹塑性模型。M. Sjöberg 等^[6-7]提出用超弹性力、粘弹性力和摩擦力叠加形成材料分数导数动力学模型, 认为摩擦力与频率无关, 仅与振幅有关; 而粘弹性力与振幅无关, 仅与频率有关。N. G. Negrete 等^[8]通过大量试验得出: 非填充橡胶动刚度

的位移幅值相关性较弱, 可以近似忽略; 而填充橡胶动刚度的位移幅值相关性较强。目前国内外有关橡胶力学试验和性能参数的研究很少考虑橡胶的压缩状态。

本工作设计了可实施橡胶在不同压缩比下剪切试验的试验夹具, 给出了测试橡胶剪切静动态特性的试验条件。提出一种橡胶剪切模型, 分别采用粘性应力和摩擦应力表征橡胶的频率相关性和振幅相关性。拟合出各模型参数随橡胶压缩比变化的函数关系。

1 橡胶剪切静动态特性试验

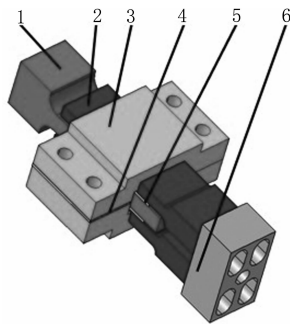
1.1 试验夹具

设计了如图 1 所示的橡胶剪切试验夹具, 在弹性体试验台上进行准静态剪切和动态剪切试验。运动块与弹性体试验台运动端连接, 锁紧块通过转接块与弹性体试验台固定端连接。在运动块与 2 个锁紧块之间放入 2 个对称布置的橡胶试样, 在 2 个锁紧块外部套上 2 个夹板。夹板与锁紧块连接处为卡槽结构, 防止高频动态剪切试验时二者发生相对滑动。橡胶试样压缩后与压缩前的厚度之比为压缩比, 通过安装不同厚度垫片的组合可以实现不同的压缩比。弹性体试验台工作时具有自动对中功能, 可以保证 2 个橡胶试样具有相同的压缩比, 橡胶试样尺寸为 40 mm × 20 mm × 8 mm。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275175)

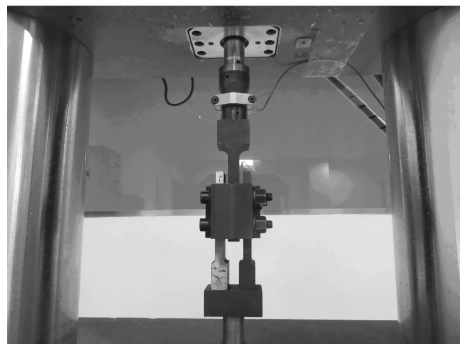
作者简介: 赵旭(1988—), 男, 广东汕头人, 硕士, 现在东风日产乘用车有限公司, 主要从事汽车振动、噪声分析与控制研究。

* 通信联系人



1—运动块;2—锁紧块;3—夹板;4—垫片;
5—橡胶试样;6—转接块。

(a)3D 模型



(b)实物

图 1 橡胶剪切试验夹具

1.2 准静态剪切试验

为了测试橡胶的振幅相关特性,设计了准静态试验。对橡胶试样施加稳态简谐位移激励,测试固定端的力(F)随运动端位移(x)变化的关系曲线,记为

$$F = f(x) \tag{1}$$

为了尽量减少粘性力的影响,准静态剪切试验应使用较低的激振频率和较大的激振振幅。本试验采用频率为 0.2 Hz、振幅为 5 mm 的稳态简谐位移激励,进行压缩比 20%~50%的准静态剪切试验。

1.3 动态剪切试验

为了测试橡胶的频率相关特性,设计了动态试验。对橡胶试样施加简谐位移激励,激励位移幅值保持不变,激振频率逐渐增大,测试橡胶试样剪切刚度(k^*)随激振频率(f_e)变化的关系曲线,记为

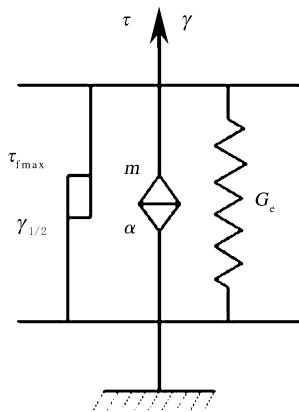
$$|k^*| = g(f_e) \tag{2}$$

为了尽量减少摩擦力的影响,动态剪切试验

应使用较小的激励位移幅值。本试验采用振幅为 0.1 mm 的简谐位移激励,激振频率从 5 Hz 逐渐上升到 500 Hz,进行压缩比 20%~50%的动剪切态试验。

2 剪切模型

为了消除不同尺寸参数对橡胶力学性能参数的影响,采用应力-应变的函数关系描述橡胶材料的动态特性。橡胶的动态特性不仅与频率有关,而且与振幅有关。橡胶试样剪切模型如图 2 所示。



τ —总剪切应力; γ —剪切应变; m —单元粘性系数; α —分数导数阶; $\tau_{\max}$ —最大摩擦应力; $\gamma_{1/2}$ —1/2 最大摩擦应力时的应变; G_e —弹性剪切模量。

图 2 橡胶试样剪切模型

假设橡胶材料的频率相关性和振幅相关性相互独立,用粘性应力表征频率相关性,用摩擦应力表征振幅相关性,得

$$\tau = \tau_e + \tau_v + \tau_f \tag{3}$$

式中, τ_e 为弹性剪切应力, τ_v 为粘性剪切应力, τ_f 为摩擦剪切应力。

2.1 弹性应力模型

弹性应力模型中, τ_e 与 γ 为线性函数关系:

$$\tau_e = G_e \gamma \tag{4}$$

2.2 粘性应力模型

粘性应力模型引入分数导数阶概念,可以用较少的模型参数来表征橡胶材料的频率相关性。 τ_v 与 γ 的函数关系为

$$\tau_v = m D^\alpha(\gamma) \tag{5}$$

式中, $0 < \alpha \leq 1$, $D^\alpha(\gamma)$ 表示 (γ) 对时间 t 的 α 阶导数。

实际计算时,式(5)可等效为如下数值迭代计

算形式^[9]:

$$\tau_v(n\Delta t) = m \frac{\Delta t^{-\alpha}}{\Gamma(-\alpha)} \sum_{j=0}^{n-1} \frac{\Gamma(j-\alpha)}{\Gamma(j+1)} \gamma[(n-j)\Delta t] \quad (6)$$

式中, Δt 为等间隔时间步长, Γ 为 Gamma 函数, $n\Delta t$ 表示某一时刻。

2.3 摩擦应力模型

摩擦应力由填充物与橡胶之间的摩擦产生, 与频率无关, 只与振幅有关。当橡胶应变沿着正向变化时, 摩擦应力为

$$\tau_f = \tau_{fs} + \frac{\gamma - \gamma_s}{\gamma_{1/2}(1 - \mu) + (\gamma - \gamma_s)} (\tau_{fmax} - \tau_{fs}) \quad (7)$$

$$\mu = \tau_{fs} / \tau_{fmax}$$

当橡胶应变沿着反向变化时, 摩擦应力为

$$\tau_f = \tau_{fs} + \frac{\gamma - \gamma_s}{\gamma_{1/2}(1 + \mu) - (\gamma - \gamma_s)} (\tau_{fmax} + \tau_{fs}) \quad (8)$$

式中, τ_{fs} 和 γ_s 为一组对应的摩擦应力和应变, 从起始位置(0,0)开始, 每一步迭代计算后都必须进行更新, 即当前一步计算的 τ_{fs} 和 γ_s 为上一步计算得到的 τ_f 和计算使用的 γ 。橡胶剪切应力与剪切应变的函数关系曲线如图 3 所示。

3 模型参数识别

3.1 原理

基于本文提出的橡胶剪切模型, 由准静态剪切试验测得的橡胶特性曲线识别弹性应力模型和摩擦应力模型参数, 由动态剪切试验测得的橡胶特性曲线识别粘性应力模型参数。

橡胶试样剪切变形如图 4 所示, 得

$$\tau = \frac{F}{2A} \quad (9)$$

$$\tau \approx \tau_e + \tau_f = \begin{cases} G_e \gamma + \tau_{fs} + \frac{\gamma - \gamma_s}{\gamma_{1/2}(1 - \mu) + (\gamma - \gamma_s)} (\tau_{fmax} - \tau_{fs}), & \text{当 } \gamma \text{ 沿正方向变化时} \\ G_e \gamma + \tau_{fs} + \frac{\gamma - \gamma_s}{\gamma_{1/2}(1 + \mu) - (\gamma - \gamma_s)} (\tau_{fmax} + \tau_{fs}), & \text{当 } \gamma \text{ 沿负方向变化时} \end{cases} \quad (14)$$

因此, 可通过最小二乘法计算得到 G_e 、 τ_{fmax} 和 $\gamma_{1/2}$ 的拟合值, 使由式(14)计算得到的 τ 与 γ 的函数关系满足式(13)所示的由试验数据换算得到的 τ 随 γ 变化的关系曲线。

在橡胶动态剪切试验中, 橡胶的 k^* 和动态剪切模量(G^*)可分别表示为

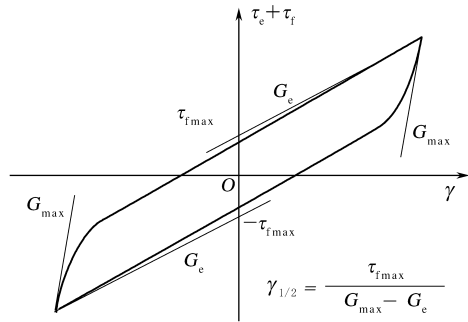


图3 橡胶剪切应力与剪切应变的函数关系曲线

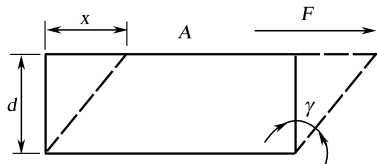


图4 单个橡胶试样剪切变形示意

$$\gamma = \tan\left(\frac{x}{d}\right) \approx \frac{x}{d} \quad (10)$$

式中, A 为橡胶试样压缩后与试验夹具的接触面积, d 为橡胶试样压缩后的厚度。

橡胶试样压缩比(ξ)为

$$\xi = \frac{d_0 - d}{d_0} \quad (11)$$

式中, d_0 为橡胶试样压缩前的厚度。

假设橡胶试样压缩过程中体积保持不变, 得

$$A_0 d_0 = A d \quad (12)$$

式中, A_0 为橡胶试样压缩前的面积。

由式(1)和(9)~(12), 可求得准静态剪切试验中橡胶剪切应力随剪切应变变化的关系:

$$\tau = \frac{(1 - \xi) f[\gamma d_0 (1 - \xi)]}{2A_0} \quad (13)$$

在橡胶准静态试验中, 激振频率很低, 橡胶粘性应力可忽略不计, 即

$$k^* = \frac{F_A}{x_A} \quad (15)$$

$$G^* = \frac{\tau_A}{\gamma_A} \quad (16)$$

式中, F_A 为固定端测得的力的幅值, x_A 为运动端位移激励的幅值, τ_A 为橡胶剪切应力的幅值, γ_A 为橡胶剪切应变的幅值。

由式(2),(9)~(12)和(15)~(16),可求得橡胶动态剪切模量随激振频率变化的关系:

$$|G^*| = \frac{(1-\xi)^2 d_0}{2A_0} g(f_e) \tag{17}$$

在橡胶动态试验中,位移激励幅值很小,橡胶

$$|G^*| = \left| \frac{\tau_A}{\gamma_A} \right| = |G_e + m(i2\pi f)^a| = \sqrt{[G_e + (m2\pi f)^a \cos(\frac{\pi}{2}\alpha)]^2 + [(m2\pi f)^a \sin(\frac{\pi}{2}\alpha)]^2} \tag{20}$$

因此,可通过最小二乘法计算得到 m 和 α 的拟合值,使由式(20)计算得到的动态剪切模量与激振频率的函数关系满足式(17)所示的由试验数据换算得到的动态剪切模量随激振频率变化的关系。

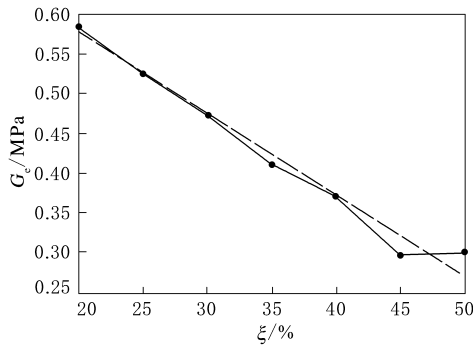
3.2 模型参数识别结果

对橡胶试样进行准静态剪切和动态剪切试验,分别计算不同压缩比下橡胶剪切模型参数的拟合值,结果如表 1 所示。

表 1 橡胶剪切试验拟合得到的橡胶剪切模型参数

$\xi/\%$	G_e/MPa	τ_{fmax}/MPa	$\gamma_{1/2}$	$m/(\text{Ns}^a \cdot \text{mm}^{-3})$	α
20	0.585	0.122	0.104	0.044	0.545
25	0.525	0.131	0.099	0.042	0.549
30	0.474	0.140	0.100	0.047	0.552
35	0.412	0.148	0.107	0.047	0.547
40	0.371	0.151	0.126	0.049	0.552
45	0.297	0.159	0.137	0.050	0.553
50	0.301	0.180	0.167	0.051	0.517

由表 1 可见, $G_e, \tau_{fmax}, \gamma_{1/2}$ 和 m 均随着 ξ 的改变而改变,故通过最小二乘曲线拟合,得到这 4 个参数与 ξ 的函数关系曲线,如图 5~8 所示,拟合公式如式(21)~(24)所示。 α 基本不随 ξ 的改变而改变,可近似等效为一个定值,取表中各试验识别值的平均值,如式(25)所示。



●—识别值;---拟合曲线。
图 5 G_e 与 ξ 的函数关系拟合曲线

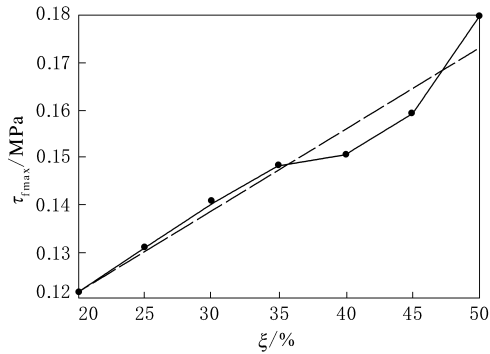
摩擦应力可忽略不计,即

$$\tau \approx \tau_e + \tau_v = G_e \gamma + m D^a(\gamma) \tag{18}$$

对式(18)进行傅里叶变化,得

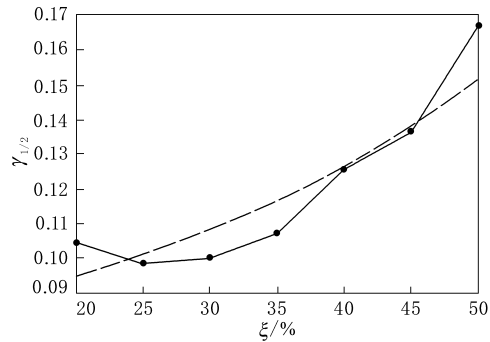
$$\tau_A = G_e \gamma_A + m(i2\pi f)^a \gamma_A \tag{19}$$

式中, i 为虚数单位, f 为频率。由式(19)可得



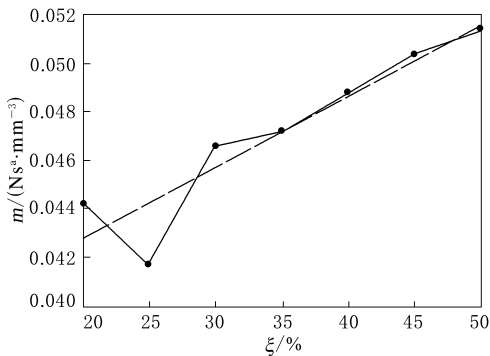
注同图 5。

图 6 τ_{fmax} 与 ξ 的函数关系拟合曲线



注同图 5。

图 7 $\gamma_{1/2}$ 与 ξ 的函数关系拟合曲线



注同图 5。

图 8 m 与 ξ 的函数关系拟合曲线

橡胶剪切模型参数与橡胶压缩比函数关系为

$$G_e = -1.008\xi + 0.7762 \quad (21)$$

$$\tau_{\max} = 0.173\xi + 0.08679 \quad (22)$$

$$\gamma_{1/2} = \frac{0.07594}{1-\xi} \quad (23)$$

$$m = 0.02943\xi + 0.03689 \quad (24)$$

$$\alpha = 0.5451 \quad (25)$$

4 结论

(1)设计了可改变压缩比的橡胶剪切试验夹具和橡胶准静态和动态剪切试验方法。

(2)提出了一种橡胶剪切模型,剪切应力由弹性应力、粘性应力和摩擦应力叠加。分别采用粘性应力和摩擦应力表征橡胶的频率相关性和振幅相关性。

(3)推导了由橡胶剪切试验测得的橡胶静态特性曲线识别橡胶模型参数的公式,给出了一个橡胶剪切模型参数识别结果,并通过曲线拟合得到各模型参数随压缩比变化的函数关系。

参考文献:

- [1] 唐振寰,罗贵火,陈伟,等.橡胶隔振器黏弹性5参数分数导数并联动力学模型[J].航空动力学报,2013,28(2):275-282.

- [2] Mats B. A Non-linear Rubber Spring Model for Rail Vehicle Dynamics Analysis[J]. Vehicle System Dynamics, 1988, 30(3-4):197-212.
- [3] Pritz T. Analysis of Four-parameter Fractional Derivative Model of Real Solid Materials[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 195(1):103-115.
- [4] Yajima T, Nagahama H. Differential Geometry of Viscoelastic Models with Fractional-order Derivatives[J]. Journal of Physics. A: Mathematical and Theoretical, 2010, 43(38):1-9.
- [5] 潘孝勇,上官文斌,柴国钟,等.橡胶隔振器动态特性计算方法的研究[J].振动工程学报,2009,22(4):345-351.
- [6] Sjöberg M, Kari L. Non-linear Behavior of a Rubber Isolator System Using Fractional Derivatives[J]. Vehicle System Dynamics, 2002, 37(3):217-236.
- [7] Sjöberg M. Nonlinear Isolator Dynamics at Finite Deformations: An Effective Hyperelastic, Fractional Derivative, Generalized Friction Model[J]. Nonlinear Dynamics, 2003, 33(3):323-336.
- [8] Negrete N G, Vinolas J, Kari L. A Simplified Methodology to Predict the Dynamic Stiffness of Carbon Black Filled Rubber Isolators Using a Finite Element Code[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 296(4/5):757-776.
- [9] Oldham K B, Spanier J. The Fractional Calculus[M]. New York: Academic Press, 1974.

收稿日期:2014-09-09

橡胶行业首次主导制定国际标准

——《汽车涡轮增压器橡胶软管规范》正式发布

中图分类号:F416.7;TQ336.3 文献标志码:D

我国橡胶行业主导制定的第一个国际标准《汽车涡轮增压器橡胶软管规范》正式发布。该标准由沈阳橡胶研究设计院(以下简称沈阳院)牵头制定,填补了我国橡胶行业主导制定国际标准的空白,提高了我国橡胶领域的国际标准化水平。

2009年全国橡胶与橡胶制品标准化技术委员会软管分会在对ISO 11424:1996《内燃机空气和真空系统用橡胶软管和纯胶管规范》进行复审时,提出了加强涡轮增压器软管产品规格、耐热等级和性能要求的建议。国际标准化组织橡胶和橡胶制品技术委员会橡胶和塑料软管分技术委员会

根据我国的建议,确定单独制定一个新的国际标准,即ISO 17324:2014《汽车涡轮增压器橡胶软管规范》。2010年10月,在荷兰召开的ISO/TC45第58次会议上,沈阳院标准化中心主任、全国橡标委秘书长刘惠春争取到该项目,并被指定为项目负责人。

该国际标准从起草到发布历时3年多。标准详细规定了用于汽车涡轮增压器系统中,连接空气滤清器、涡轮增压器、中冷系统和内燃机的橡胶软管的材料和结构、尺寸和公差、物理性能、试验方法和频次等,并根据工作温度和工作压力等操作条件对软管进行了详细的分类。

该国际标准在投票时得到各成员国的一致通过,因此不再进行最终国际标准草案(FDIS)投票,可以直接进入发布阶段。

(摘自《中国化工报》,2014-12-22)