# 减振器橡胶动态剪切特性测试及黏 – 超 弹模型仿真应用

袁子豪<sup>1</sup>,王克俭<sup>1,\*</sup>,涂春潮<sup>2</sup>,黄艳华<sup>2</sup>,苏正涛<sup>2</sup>

1. 北京化工大学 机电工程学院,北京 100029

2. 中国航发北京航空材料研究院,北京 100095

**摘 要**:在橡胶加工分析仪 (RPA) 表征混炼胶硫化过程的黏弹性后,对其进行固态切应力松弛试验来检测橡胶动态剪 切黏弹参数值 (如 Prony 级数模型的切变模量和松弛时间)。进一步结合单轴、平面及等双轴拉伸试验检测的 Yeoh 模型表 达的超弹性参数值来建立并联叠加型黏-超弹模型定量表达式。将其类比 Maxwell 模型形式导入 ABAQUS 有限元软件,预 测橡胶试样的双剪切动态响应。数值模拟结果与试验数据基本吻合,可反映应变幅值和频率变化对载荷—位移滞后环 和动刚度的影响。RPA 动态剪切法制样简单、操作方便,为预测减振器等弹性元件在较大受剪下的动态力学响应提供 基础。

关键词:RPA , 切应力松弛 , 黏 - 超弹模型 , 载荷—位移滞后环 , 动刚度 , 有限元分析

#### 中图分类号: TH212; TH213.3 文献标识码: A DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2018.06.061

金属和橡胶复合减振器广泛用于航空、航天、交通车辆 等诸多领域。准确描述和预测填充橡胶复合金属减振器性 能对正确设计和应用十分重要<sup>[1]</sup>。

减振器常用填充橡胶作为承载的弹性材料,即黏弹性 高分子基体中添加炭黑等组分进行补强的复合材料。静态 载荷下其应力具有典型的应变、应变速率及时间的依赖性。 动态载荷下随振动应变幅值和频率发生非线性变化。静态 力学特性常用 Neo-Hookean、Mooney-Rivlin、Yeoh、Ogden 等超弹性模型描述<sup>[2,3]</sup>。静态变形中应变率和动态变形中 频率的变化引起其黏弹性行为<sup>[4]</sup>。黏弹模型主要有 Kelvin-Voiget、Maxwell 和分数阶导数模型等。减振器具有应变和 应变速率的双重依赖性,即需要把超弹性和黏弹性耦合才 能较好地预测其动态特性<sup>[5]</sup>,本文采用黏 – 超弹模型进行 研究。

超弹性和黏弹性叠加预测时要求简便而可靠地检测材 料特性参数,以便用材料本构模型定量描述力学行为。具体 检测模式应根据变形特点来选择,如单轴拉伸应力松弛<sup>16</sup>、压

缩应力松弛<sup>[7]</sup>或 DMA 频率扫描模式测试后,对应力一应变/ 应变速率进行适当本构关系的拟合获得材料参数<sup>[8]</sup>。针对 硫化胶的剪切变形试验较为复杂,大多在试验机上通过特定 夹具将轴向拉伸或压缩转变成剪切变形来实现,夹具不仅复 杂且为组合变形,获取剪切变形的黏弹性参数的难度大,且 可靠性不高。如DMA 剪切模式测试的应变幅值不大(一 般小于 30μm,且随频率增大而减小)。而且,需要从硫化 试样上截取或直接硫化成型为测试样品,程序复杂。实际 上,橡胶硫化前,流态下测试大多采用硫化仪旋转剪切形式, 应变范围可达到100%,且可采用应变、频率和温度扫描检 测。而且,混炼胶能够充分充满到橡胶加工分析仪 (Rubber Processing Analyzer, RPA) 旋转流变仪模腔,硫化过程进行 黏弹态测试后成为固态,上下模腔辐射状槽镶嵌试样,此时 可直接对其施加剪切,以多种扫描形式进行测试。该方法优 势在于:流态和固态测试为同一试样,无须重新制样;无须 另外夹具。

本文采用 RPA 流变仪对硫化后样品测试橡胶的切应力

\*通讯作者.Tel.: 13911728601 E-mail: wangkj@mail.buct.edu.cn

引用格式: Yuan Zihao, Wang Kejian, Tu Chunchao, et al. Dynamic shear characteristics of damper rubber and simulation application in visco-hyperelastic model [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (06): 61-67. 袁子豪, 王克俭,涂 春潮,等. 减振器橡胶动态剪切特性测试及黏-超弹模型仿真应用 [J]. 航空科学技术, 2018, 29 (06): 61-67.

收稿日期:2018-04-19; 退修日期:2018-05-07; 录用日期:2018-05-25

基金项目: 航空科学基金 (201535S9001)

松弛特性,采用单轴、等双轴及平面拉伸试验测试其超弹性 拉伸变形特性,从而拟合获取本构关系中材料参数值。然后 将该模型用于 ABAQUS 有限元软件预测该橡胶的双剪切 测试试验结果。

# 1 采用的材料本构关系

按照增强橡胶是炭黑分布于橡胶化学交联网络中形成 粒子填充网络的基本结构,总应力是粒子填充体系超弹性分 量与橡胶基体黏弹性分量之和:

 $\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^{h} + \boldsymbol{\sigma}^{v} \tag{1}$ 

式中: $\sigma^h$ 、 $\sigma^v$ 分别为超弹性、黏弹性 Cauchy 应力(即真应力)张量。这种并联叠加模型类似于 Maxwell 模型,在 ABAQUS 软件较容易识别参数。

#### 1.1 超弹性本构关系

增强橡胶近似为各向同性且由于体积模量通常较高故 视为体积不可压缩的材料,其超弹性用非线性本构模型描述<sup>[9]</sup>:

$$\boldsymbol{\sigma}^{h} = -p^{h}\boldsymbol{I} + 2\left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_{1}} + I_{1}\frac{\partial W}{\partial I_{2}}\right)\boldsymbol{B} - \frac{\partial W}{\partial I_{2}}\boldsymbol{B}^{2}\right]$$
(2)

式中: $p^{h}$ 静水压力,I为单位矩阵,W为应变能函数,B为左 Cauchy变形张量:

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0\\ 0 & \lambda_2^2 & 0\\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix}$$
(3)

式中: F 为变形梯度张量,  $F^{T}$  为变形梯度张量转置,  $\lambda_{1}$  为主 拉伸比 (*i*=1, 2, 3)。

左 Cauchy 变形张量 *B* 的第一、第二和第三应变不变项分别为:

$$I_1 = tr \boldsymbol{B}, I_2 = 0.5(I_1^2 - tr \boldsymbol{B}^2), I_3 = \det \boldsymbol{B}$$
 (4)

橡胶不可压缩时  $I_3=1$ ,  $W=W(I_1, I_2)$ 。

Yeoh 和 Gent 采用 *I*<sub>1</sub> 的高阶项对 Neo-Hookean 模型的 应变能函数进行修正为缩减多项式 (Reduced-Polynomial model)<sup>[4]</sup>。其应变能函数为:

$$W = \sum_{i=1}^{N} C_{i0} \left( I_1 - 3 \right)^i$$
(5)

*N*=1 时称为Neo-Hookean模型, *N*=3为Yeoh模型。 Yeoh 超弹性本构模型展开为:

$$\sigma_1^h = \sum_{i=1}^{N=3} 2iC_{i0}^{\text{UT}} \left(\lambda^2 + 2\lambda^{-1} - 3\right)^{i-1} \left(\lambda^2 - \lambda^{-1}\right)$$
(6)

式中:C<sup>UT</sup>为单轴拉伸下材料参数。

Yeoh 模型中切变模量随应变而变化范围较大,简单变

形可用于预测其他变形形式的力学性能。主拉伸比由对应 不同状态给出:单轴拉伸 (UT) 时, $\lambda_1 = \lambda$ ,  $\lambda_2 = \lambda^{-1/2}$ ; 平面拉伸 (PT) 时, $\lambda_1 = \lambda$ ,  $\lambda_2 = 1$ ,  $\lambda_3 = \lambda^{-1}$ ; 等双轴拉伸 (ET) 时, $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ ,  $\lambda_3 = \lambda^{-2}$ 。名义应力  $p_i = \sigma_i / \lambda_i$ 。

这样,对应名义应力与主拉伸比关系为:

$$\begin{cases} p_{\text{UT}}^{h} = \sum_{i=1}^{N-3} 2iC_{i0}^{\text{UT}} \left(\lambda^{2} + 2\lambda^{-1} - 3\right)^{i-1} \left(\lambda - \lambda^{-2}\right) \\ p_{\text{PT}}^{h} = \sum_{i=1}^{N-3} 2iC_{i0}^{\text{PT}} \left(\lambda^{2} + \lambda^{-2} - 2\right)^{i-1} \left(\lambda - \lambda^{-3}\right) \\ p_{\text{ET}}^{h} = \sum_{i=1}^{N-3} 2iC_{i0}^{\text{PT}} \left(2\lambda^{2} + \lambda^{-4} - 3\right)^{i-1} \left(\lambda - \lambda^{-5}\right) \end{cases}$$
(7)

#### 1.2 黏弹性本构关系

橡胶黏弹性分量是应变率与加载历史的函数:

$$\boldsymbol{\sigma}^{\boldsymbol{\nu}} = -p^{\boldsymbol{\nu}}\boldsymbol{I} + \boldsymbol{F}(t) \cdot \frac{\boldsymbol{\Omega}}{\boldsymbol{\sigma}} \left\{ \boldsymbol{C}(t) \right\} \cdot \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}(t)$$
(8)

式中: $p^{v}$ 为静水压;C为右 Cauchy 变形张量, $C=F^{T} \cdot F$ ; $\Omega$  描述历程影响的张量,近似为<sup>[10]</sup>:

$$\underset{\tau=-\infty}{\overset{t}{\Omega}} \left\{ \boldsymbol{C}(t) \right\} = \int_{-\infty}^{t} \phi(I_1, I_2) m(t-\tau) \dot{\boldsymbol{E}}(\tau) \mathrm{d}\tau$$
 (9)

式中:  $\dot{E}$ 为应变速率, 是 Green 应变张量的时间导数,  $E=(C-I)/2, m(t-\tau)$ 为松弛函数。通常, *m* 表达为 Prony 级数 形式:

$$m(t-\tau) = \sum_{i=1}^{N} \exp\left(-(t-\tau) / \theta_i\right)$$
(10)

式中: $\theta_i$ 为松弛时间, N为 Prony 级数的阶数。

# 2 样品制备及试验方法

## 2.1 样品制备

在密炼机中投入相应份数的天然橡胶生胶(牌号 SCR3,海南天然橡胶产业集团股份有限公司)60℃塑炼 1min。顺序添加计算量(见表1)的硬脂酸、氧化锌,混 炼1.5min。添加对应份数的炭黑(N550,河北龙星化工 集团有限责任公司)、炭黑(N774,美国Cabot公司)、微晶 石蜡、凡士林和癸二酸二辛酯的混合物,扭矩平衡后即混 合均匀,排胶。室温下,在开炼机上,添加促进剂和硫磺 的预混料,打三角包5遍薄通,下片。室温放置24h,待测 试用。

将混炼胶在橡胶液压平板硫化仪硫化,硫化温度为 150℃,硫化时间 10min (RPA 测得),压力 10MPa。制得 150mm×150mm×2mm 的硫化胶片。根据 GB/T 533—2008 测得硫化橡胶密度 1.3g/cm<sup>3</sup>;根据 GB/T 531—2009 测得肖 氏 A 硬度为 65。

表 1 橡胶配方 (质量分数) Table 1 Formula of rubber material (mass fraction)

天然橡胶	氧化	硬脂	防老剂	微晶	炭黑	炭黑	癸二酸	凡士	促进	硫磺
(SCR3)	锌	酸	4010NA	石蜡	N550	N774	二辛酯	林	剂	
100	5	2	2	0.5	40	30	5	0.5	0.7	2.5

#### 2.2 超弹性试验及数据处理

如图1(a)所示,分别从硫化胶片上切取等双轴拉伸、 单轴拉伸和平面拉伸试样,每种试验重复三次取平均值作为 试验结果。



(a) 等双轴拉伸、单轴拉伸和平面拉伸试样



(b) 等双轴拉伸

(c) 平面拉伸



等双轴拉伸试样过形心线上粘贴垂直于该线的反光片 进行标距,如图1(b)所示,室温25℃下的等应变速率0.01/s 拉伸,预拉伸循环三次后记录第4次的应力—应变数据,单 轴拉伸样条按GB/T529—2009的I型试样,在标距位置两 端粘贴反光片;平面拉伸试样为150mm×25mm×2mm平 片,试验时上下各夹持6mm,如图1(c)所示,垂直于轴线粘 贴反光片标距。

三种拉伸测试的试验结果如图2所示。等双轴拉伸、 单轴拉伸和平面拉伸的试验应力—应变曲线均出现两阶段 快速上升,均显示超拉伸特点。

采用 Yeoh 模型进行拟合,根据体积不可压缩假设,则 D<sub>i</sub>=0 (*i*=1,2,3),拟合参数见表 2。模型基本体现了材料特 性,但对于单轴拉伸,在小应变下略小于试验值而在大应变 下略高于试验值,对平面拉伸预测较准确,对小应变等双轴 拉伸拟合较好。



图 2 三种拉伸试验结果与 Yeoh 模型拟合对比 Fig.2 Comparison of experimental data with the fitted values by Yeoh model in three tensile tests

表 2 Yeoh 模型参数 Table 2 Parameters value of Yeoh model

C <sub>10</sub>	$C_{20}$	$C_{30}$	$D_1, D_2, D_3$
0.794	-0.161	0.007	0

#### 2.3 RPA 黏弹性试验及数据处理

将混炼胶放入 RPA2000 (美国阿尔法科技公司)模腔 (如图3所示) 150℃下硫化 10min 后降温至50℃并保温 3min,接着5s内设置为切应力松弛模式进行测试,扭转角分 别在2.5°、5°和10°(应变34.89%、69.78%和139.56%),测试1700s。硫化样品适应锥楔腔形状,并以辐射槽嵌合在上下 转子表面,这样上下转子相对扭转便是对其中试样的剪切。



图 3 RPA2000 转子示意图 Fig.3 The schematic diagram of RPA2000 rheometer

图 4 (a) 为 RPA 测试时扭矩随测试时间的变化关系, 从图中可以看出扭矩先下降然后达到平衡,剪切应变幅值 越大则扭矩响应越大。用不同扭转角下最大扭矩除以实际 扭矩,得到归一化扭矩值,如图 4 (b) ~ 图 4 (d) 所示。使用 Origin 软件中的 Levenberg-Marquardt 非线性回归算法拟合 归一化试验数据,来拟合式 (11) 中各阶 Prony 级数对应剪 切模量和松弛时间的系数。

$$g_{R}(t) = 1 - \sum_{i=1}^{N} g_{i} \left( 1 - e^{-t/\tau_{i}} \right)$$
(11)

式中: $g_R$ 为无量纲切变松弛模量, $g_i$ 、 $\tau_i$ 分别为无量纲切变模量与松弛时间。



图 4 RPA 剪切试验中扭矩随时间变化 Fig.4 Torque versus time at in RPA shear tests

迭代时利用梯度求最大或最小值,将每个待定参数求 偏导最终得到收敛解。摆角10°、5°和2.5°下的 Prony级 数模型参数值分别见表3~表5。

## 表 3 扭转角 10°时 Prony 级数模型的参数值

Table 3 Parameters value of Prony series model at torque angle 10°

级数	$g_i$	$\tau_i(s)$
1	0.23767	0.05051
2	0.13320	0.81690
3	0.30764	39.11853
4	0.31002	392.53539

#### 表 4 扭转角 5°时 Prony 级数模型的参数值

Table 4 Parameters value of Prony series model at torque angle 5°  $\,$ 

级数	$g_i$	$\tau_i(s)$
1	0.07855	0.00228
2	0.05107	0.56297
3	0.05971	40.54351
4	0.06974	596.70189

表5 2.5°时 Prony 级数模型的参数值

Table 5 Parameters value of Prony series model at torque angle 2.5°

级数	$g_i$	$\tau_i(s)$
1	0.28375	0.04218
2	0.16578	0.38938
3	0.15475	17.92514
4	0.38794	393.40557

以图 4 (a) 中扭转角为 5° 的扭矩随时间变化的松弛曲 线为例,3 阶 Prony 级数并不能较好反映松弛曲线,4 阶级 数拟合基本吻合试验结果,过高阶次级数虽更能准确描述但 势必增加计算成本。因此,表3~表5 均列出4 阶级数参数 来描述硫化胶的黏弹性。

#### 2.4 双剪切试验及数据处理

为了验证上述材料参数值检测方法具有一定的可 靠性,设计如图5(a)所示双剪切测试夹具,将上、下夹 具内嵌在模具,在其间填上上述同样的混炼胶,采用相同 的硫化工艺将上、下夹具黏结在一起,每侧胶界面尺寸为 16mm×40mm×5mm(厚度)。

上、下夹具分别通过螺纹连接,加持在 Instron-2kN 拉 力试验机上进行位移强迫非共振拉伸试验(如图 5 (b)所 示),其中连接橡胶受到剪切作用。在固定端安装力传感器, 在可动端安装位移传感器,监测并记录拉伸力一位移。测试 分两个模式:(1)1mm 位移幅值下,分别在 10Hz 和 8Hz 进 行恒定频率动态测试,获取载荷一位移滞回环;(2)1mm 位 移幅值下,进行阶梯式频率扫描,检测动刚度随频率变化的 关系。





(a) 双剪切测试夹具

图 5 动态双剪切试验夹具和在拉力机上的安装

Fig.5 Dynamic double lap shear test fixture and installation on tension machine

# 3 双剪切数值仿真分析

为验证上述黏 - 超弹本构模型可预测图 5 (b) 动态双 剪切橡胶的载荷—位移关系,采用 ABAQUS 软件进行三维 数值分析橡胶黏弹滞后。

采用其中的 Standard Gernal-Dynamic Implicit 隐式动力学 模式求解该非线性问题。分析步中 Nlgeom 几何/材料采用 Moderate dissipation 非线性模式。式(1)形如广义 Maxwell 模型,据此生成计算迭代形式并定义材料单元。其中黏弹性是 对近广义 Maxwell 模型微分本构方程作 Laplace 变换得切变 模量,去量纲化后以 Prony 级数表达,以应力松弛数据输入由 ABAQUS 自动选择对应阶次的 Prony 级数进行拟合材料参数。

橡胶与金属板的黏结界面上选择金属面作主面 (master)、橡胶面作从面(slave)的Tie约束。参考点设置: (1)中间动作端金属板底部几何中心(Set-load)与底面耦 合,作为输出位移值的参考点;(2)侧面双金属板固定端参 考点(Set-fixed)与侧面耦合,作为输出反力值的参考点。

边界条件:(1) 双剪切三维模型以中间金属板中面作对

称约束;(2) Set-fixed 约束六自由度;(3) Set-load 约束除位 移载荷方向上其他五自由度。沿动作方向施加周期性幅值 (Periodic) 位移载荷。

橡胶部分,划分六面体单元(Hex elements)网格数为 32000的C3D8RH单元(三维8节点线性缩减积分杂交单 元),沙漏控制(Hourglass control)增强(Enhanced)。

# 4 双剪切试验结果及仿真对比

试验中,检测如图6所示类似的正弦激励载荷和位移 随时间周期性变化,然后载荷相对位移绘图得到滞后环曲 线,从中反映材料的超弹性和黏弹损耗。



#### 图 6 输入载荷和位移响应 Fig.6 The input load and displacement response

图 7 中载荷 - 位移试验值曲线显示为典型的滞后环, 位移幅值 1mm 下,频率为 8Hz 和 10Hz 测试的滞后环面 积分别为 0.12kN·mm 和 0.11kN·mm,提高剪切频率,滞后 环变得更扁,滞后环主轴反映制件动态载荷下的刚性,定 义为动刚度,可采用线性拟合其主轴得到。频率从 8Hz 提 高到 10Hz,滞后环的主轴倾斜度由 0.443kN/mm 减小到 0.437kN/mm。





#### 65

从图 7 可以看出,模型预测结果与试验值基本吻合, 预测的滞后环面积和主轴几乎与试验值相同。这说明黏 -超弹模型可以分析相同应变幅值下改变频率对黏弹性的 影响。

在相同频率 8Hz 下,改变位移幅值得到载荷一位移 图,如图 8 所示。相同频率下,增大位移幅值获得的滞后 环明显变大而主轴斜率略微减小,即黏滞损耗增大而体系 动刚度略微减弱,增大位移幅值,剪切松弛的滞后环由椭 圆逐渐变得不规则。从模型预测结果可以看出,预测也抓 住了这些变化趋势和响应变化范围,这说明测试获取材料 黏 - 超弹性参数后的模型可以分析双剪切强迫振动中超 弹性和黏弹性耦合影响。实际上,预测的滞回曲线并非与 试验值完全重合。除试验工装和测试系统传感器的精度 误差外,制件受载荷与材料基本测试模式不完全一致有很 大关系,需要进一步选取更准确的参数检测模式和仿真模 型。





1mm 位移幅值下,对试件进行阶梯式频率扫描,检测的动 刚度随频率变化如图9所示。频率小于8Hz,增大频率显著减 小动刚度,但之后基本恒定。数值仿真结果反映了该特点,在较 大振动频率下预测的动刚度比试验值略大,这是误差造成的。



图 9 不同频率下动刚度试验值及模拟结果对比 Fig.9 Comparison of experimental values of dynamic stiffness and simulated results at different frequencies

# 5 结论

通过 RPA 切应力松弛试验和拉伸试验,分别检测硫化橡胶的黏弹性和超弹性参数值并应用于黏 - 超弹本构模型,将 其用 Maxwell 模型形式导入 ABAQUS 有限元软件,可较好 仿真橡胶试样的双剪切动态响应。从中展示了 RPA 法检测 固态橡胶剪切黏弹性的方便性和可行性,为预测减振器等弹 性元件在较大受剪下的动态力学响应提供基础。

#### 参考文献

- Treviso A, Van Genechten B, Mundo D, et al. Damping in composite materials: Properties and models [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 78: 144–152.
- [2] Nunes L C S. Mechanical characterization of hyperelastic polydimethylsiloxane by simple shear test [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528 (3): 1799–1804.
- [3] Markou A A, Manolis G D. Mechanical models for shear behavior in high damping rubber bearings [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 90: 221–226.
- [4] Gajewski M, Szczerba R, Jemiolo S. Modelling of elastomeric bearings with application of Yeoh hyperelastic material model [J].
   Procedia Engineering, 2015, 111: 220–227.

- [5] Previati G, Gobbi M, Mastinu G. Silicone gels-comparison by derivation of material model parameters [J].Polymer Testing, 2017, 58: 270–279.
- [6] Tayeb A, Arfaoui M, Zine A, et al. On the nonlinear viscoelastic behavior of rubber–like materials: Constitutive description and identification [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 130:437–447.
- [7] Fahimi S, Baghani M, Zakerzadeh M R, et al. Developing a visco-hyperelastic material model for 3D finite deformation of elastomers [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2018, 140 (15): 1–10.
- [8] Dal H, Zopf C, Kaliske M. Micro-sphere based viscoplastic constitutive model for uncured green rubber [J]. International Journal of Solids and Structures, 2018, 132–133: 201–217.
- [9] Liu M, Hoo Fatt M S. A constitutive equation for filled rubber under cyclic loading [J]. International Journal of Non-Linear

Mechanics, 2011, 46 (2): 446-456.

[10] 汪先国,罗继高,蹇开林.橡胶隔振器在某型号摩托车手传振动优化中的应用[J].重庆理工大学学报:自然科学,2015,29 (10):83-88.

Wang Xianguo, Luo Jigao, Jian Kailin. Application of rubber vibration isolation components for hand-transmitted vibration of motorcycle[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2015, 29 (10): 83–88. (in Chinese)

# 作者简介

袁子豪(1993-) 男,硕士研究生。主要研究方向:橡胶弹 性体力学。

王克俭(1971-) 男,博士生导师。主要研究方向:橡塑材 料加工成型。

Tel: 13911728601

E-mail: wangkj@mail.buct.edu.cn

# Dynamic Shear Characteristics of Damper Rubber and Simulation Application in Visco–Hyperelastic Model

Yuan Zihao<sup>1</sup>, Wang Kejian<sup>1,\*</sup>, Tu Chunchao<sup>2</sup>, Huang Yanhua<sup>2</sup>, Su Zhengtao<sup>2</sup>

1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical and Technology, Beijing 100029, China

2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China

**Abstract:** The shear stress relaxation test was carried out on Rubber Processing Analyzer (RPA) after characterizing its viscoelasticity in vulcanization process in order to check such dynamic shear viscoelastic parameters of rubber as the shear modulus and relaxation time of Prony series model. Besides, hyperelastic parameters in Yeoh model were detected by uniaxial, plane and equal biaxial tensile tests. Further, they were combined to establish the quantitative expression of a visco-hyperelastic model in parallel superposition pattern, which was similar to Maxwell model when being imported into ABAQUS finite element software to predict the dynamic double shear response of the rubber specimen. The numerical simulation results were basically in agreement with the experimental data, reflecting the influence of strain amplitude and frequency on the load-displacement hysteresis loop and dynamic stiffness. This RPA dynamic shear method is verified to be simple and easy to operate, which provides a basis for predicting the dynamic mechanical response of elastic elements such as shock absorbers under larger shear deformation.

**Key Words:** RPA; shear stress relaxation; visco-hyperelastic model; load-displacement hysteresis loop; dynamic stiffness; finite element analysis.

Received: 2018-04-19; Revised: 2018-05-07; Accepted: 2018-05-25

Foundation item: Aeronautical Science Foundation (201535S9001)

\*Corresponding author.Tel.: 13911728601 E-mail: wangkj@mail.buct.edu.cn