

# 考虑热力耦合的橡胶减振器阻尼特性\*

王 军<sup>1</sup>, 孙大刚<sup>1</sup>, 刘世忠<sup>2</sup>, 李占龙<sup>1</sup>, 章 新<sup>1</sup>

(1. 太原科技大学机械工程学院 太原, 030024) (2. 太原科技大学交通与物流学院 太原, 030024)

**摘要** 针对橡胶减振器在热力耦合减振过程中的温度和阻尼特性的变化进行分析, 引入大应变黏弹性本构模型描述橡胶材料的非线性变形和黏弹性行为。对橡胶材料进行静态试验拟合得到超弹性本构模型系数, 进行动态机械分析获得材料的储能模量时程曲线和损耗因子时程曲线并拟合得到 Prony 级数系数。假设生热率为非弹性变形产生的能量, 对模型施加边界条件和热对流边界, 基于热力耦合理论对有限元模型进行分析。结果显示: 模型中心温度最高, 并由中心向边缘逐渐降低; 不同频率下的表面温度与试验值较为接近。由于非弹性效应橡胶减振器结构动刚度和损耗因子均有损失。初始耗散能随频率增大而明显增大, 随温度升高缓慢减小; 最终耗散能对频率和温度变化不敏感, 趋于稳定。

**关键词** 橡胶减振器; 阻尼特性; 热力耦合; 刚度; 有限元

**中图分类号** O328; TH113.1

## 引 言

橡胶减振器广泛应用于机械和车辆的减振降噪, 其减振原理是利用黏弹性材料(多为橡胶等高聚物)分子间的内摩擦作用, 将机械振动能转化为内能并最终热的形式散失, 也称为黏弹性材料的阻尼特性。由于橡胶材料多为热的不良导体, 结构内部易产生热量积聚<sup>[1-2]</sup>。在这种热力相互作用下, 橡胶减振器的耗散特性逐渐下降, 最终发生功能性失效。因此研究橡胶减振器减振过程中的温升和阻尼特性的变化具有实际意义。

Yi 等<sup>[3]</sup>定量分析了温度和频率对含有自由阻尼层圆盘的瞬态响应, 结果显示温度对黏弹性材料模型和损耗因子有明显影响。Kovalenko 等<sup>[4]</sup>建立了黏弹性薄圆柱壳在扭转振动时的温升解析解, 并和准静态解进行了比较。文献[5-7]研究发现不同温度下的黏弹性材料的阻尼参数不同, 并对不同工作温度范围的黏弹性减振器进行了优化。Johnson 等<sup>[8]</sup>基于柱状橡胶的有限元模型, 将热与大应变历史积分进行耦合建立了 Maxwell 模型固体的耗能函数, 计算得到柱状橡胶的温度分布。张针粒等<sup>[9]</sup>使用六参数分数微分温度谱模型对黏弹性减振器进行了动力学分析和热力耦合温升计算。韦凯等<sup>[10]</sup>

分析了温度变化对轨道扣件胶垫静态刚度和车辆轨道垂直频响特性的影响。文献[11]假设橡胶发生小变形, 使用 FEMLAB 软件建立了橡胶减振器的热动力学耦合偏微分方程, 通过交替计算实现温度和应力的耦合。贾志绚等<sup>[12]</sup>使用单向顺序求解方法对橡胶减振器进行了稳态温度分析, 预测了高温区域出现的位置。韩广文<sup>[13]</sup>通过改变橡胶材料的试验温度, 对橡胶减振器的疲劳试验前后的静刚度和振动传递率进行了研究。

已有文献或分析不同环境温度结构力学特性的影响, 或构建不同热力耦合形式获得结构温升规律, 而对橡胶减振器在加载前后的阻尼特性的变化关注较少。笔者使用有限元法分析橡胶减振器经过周期载荷后的温度分布和阻尼特性的变化。

## 1 橡胶减振器热传导和耗能理论

橡胶减振器受到振动载荷后结构各处发生的变形不同, 橡胶材料的热传导性能较低, 使结构发生非等温过程, 其能量形式<sup>[14]</sup>为

$$\int_{v_0} \rho_0 \dot{v} \cdot v dv + \int_{v_0} \dot{\epsilon} dv = \Omega + Q \quad (1)$$

其中:  $\rho_0$  为材料密度;  $v$  为速度场;  $v_0$  为初始体积;  $\epsilon$  为未变形单位体积的内能;  $\Omega$  为机械功;  $Q$  为生成

\* 山西省“1331”重点学科建设计划经费资助项目; 太原科技大学博士启动基金资助项目(20162035; 20162005)  
收稿日期: 2017-11-08; 修回日期: 2017-12-12

的热量。

$$\dot{Q} = \int_{V_0} \mathbf{F} \cdot v dv + \int_{A_0} \mathbf{S} \cdot v dA \quad (2)$$

$$\dot{Q} = \int_{V_0} h dv_0 + \int_{A_0} \mathbf{q} \cdot n dA \quad (3)$$

其中： $\mathbf{F}$ 为体力； $h$ 为单位未变形体积的生热； $\mathbf{S}$ 为面力； $\mathbf{q}$ 为单位未变形面积的热流率。

Holzapfel等<sup>[15]</sup>通过时间和空间离散处理混合热力学边界条件和黏弹性初值问题，采用向后差分的方法把温度场整合到牛顿法非线性方程的求解中，获得了一种求解黏弹性热力耦合问题的方法。

橡胶减振器在受到载荷后，微观上表现橡胶材料长链分子的空间位置发生变化，产生微小非弹性变形并最终转化为热量。生热率 $q_g$ 代表单位体积产生的非弹性变形热量<sup>[16-18]</sup>，并有

$$q_g = \beta W \quad (4)$$

其中： $W$ 为橡胶减振器受载后功的变化量； $\beta$ 为非弹性热摩擦(inelastic heat friction, 简称 IHF)因数，表示由 $W$ 转换为热的比值。

IHF系数依赖于应变幅值和频率，范围为 $0.1 \leq \beta \leq 1$ 。由于橡胶材料的热膨胀效应和应变幅值较小，可以认为 $\beta$ 为常数<sup>[19]</sup>，取 $\beta$ 为0.1。

## 2 大应变黏弹性材料本构模型

将广义 Maxwell 黏弹性本构模型的线性弹簧用非线性弹簧代替，得到大应变黏弹性材料本构模型<sup>[20-21]</sup>。假设橡胶材料各向同性，变形时不发生体积改变。

非线性弹簧由第二 Piola-Kirchhoff 应力表示为

$$S_i = 2 \frac{\partial W}{\partial C} \quad (5)$$

其中： $W$ 为超弹性势能函数； $C$ 为右 Cauchy-Green 变形张量。

选用基于第一应变不变量 $I_1$ 的 Yeoh 模型<sup>[22-23]</sup>

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (6)$$

其中： $C_{i0}$ 为材料常数， $i=1, 2, 3$ ，通过静态拉伸材料试验确定。

黏弹性项用 Prony 级数表达，可以方便描述黏弹性材料时域和频域之间的关系，也便于进行数值离散化<sup>[24-25]</sup>。忽略体积松弛，剪切松弛模量为

$$G(t) = G_0 \left( 1 - \sum_{i=1}^n g_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \right) \quad (7)$$

进行无量纲化

$$g(t) = g_\infty + \sum_{i=1}^N g_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (8)$$

其中： $\tau_i$ 为时间常数； $g_\infty$ 和 $g_i$ 为无量纲化材料常数，且有 $g_\infty + \sum_{i=1}^N g_i = 1$ 。

需对橡胶材料进行动态热机械分析(dynamic mechanical analysis, 简称 DMA)获得 Prony 级数的参数。

## 3 本构模型参数的确定

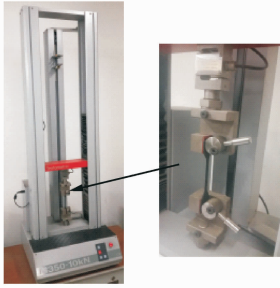
### 3.1 静态拉伸试验

按照 GB/T 2941-2006<sup>[26]</sup>制备 I 型哑铃型橡胶材料标准试样。如图 1(a)所示，在 M350-10 kN 型拉伸试验机上按照 GB/T 528-2009<sup>[27]</sup>对试样进行静态单轴拉伸试验，得到单轴拉伸应力-应变曲线，如图 1(b)所示。可以看出，在应变小于 10% 时，应力-应变关系接近线性，此后非线性现象逐渐明显。拟合得到 Yeoh 模型应变能函数系数 $C_{10} = 0.55$  MPa， $C_{20} = -0.06$  MPa， $C_{30} = 0.008$  MPa。在应变范围 150% 以下，Yeoh 超弹性本构模型曲线与单轴拉伸试验曲线重合度较好，可以较为精确地描述材料的静态力学特性。

### 3.2 DMA 试验

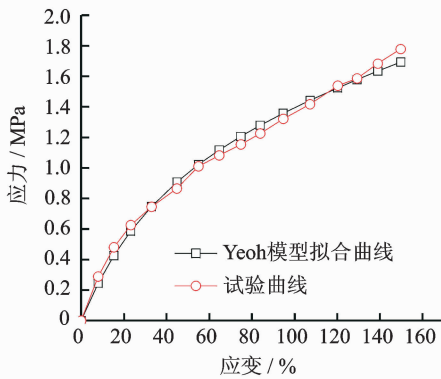
依据 ASTM-E 2254-2009 标准<sup>[28]</sup>和 ASTM E2425-2005 标准<sup>[29]</sup>，使用动态机械分析仪 DMA242C 对橡胶试样进行动态力学分析，如图 2(a)所示。试验频率分别为 0.5, 1.0, 2.5, 3.33, 5.0 和 10 Hz，恒定振幅为 0.002 m，温度范围为 20~80℃，升温速率为 2℃/min，加载方式为三点弯曲。取温度为 20℃, 40℃, 60℃ 和 80℃ 4 个温度下的储能拉伸模量和损耗因子的频域特性曲线，如图 2(b)所示。4 种试验温度下的储能拉伸模量曲线呈平行曲线：在 0.5~5 Hz 内呈波浪形升高，在 5~10 Hz 时则较为平缓。4 种温度下的损耗因子变化趋势亦呈平行曲线，但曲线平滑，0~5 Hz 变化较快，5~10 Hz 则接近水平直线。假设泊松比不变，令式(5)中 $n=3$ ，对 4 个温度下的 Prony 级数系数分别进行拟合。取目标函数<sup>[30-31]</sup>为

$$\min F(g, \tau) = \sum_{i=1}^M \left( \left( \frac{G'(\omega_i)}{G'} - 1 \right)^2 + \left( \frac{G''(\omega_i)}{G''} - 1 \right)^2 \right) \quad (9)$$



(a) 橡胶材料拉伸试验机及试样安装

(a) Rubber material tensile testing machine and specimen installation



(b) 应力-应变曲线

(b) Curve of strain-stress

图 1 橡胶材料单轴拉伸试验

Fig. 1 Uniaxial tension test of rubber material

其中:  $G'(\omega)$  和  $G''(\omega)$  为储能模量和耗能模量;  $\omega_i$  为圆频率。

由于在温度范围内橡胶材料的黏弹性特性较为稳定,每个温度下的  $g_i$  和  $\tau_i$  均相同,取  $g_1 = 0.5$ ,  $\tau_1 = 1.0 \times 10^{-7}$ ;  $g_2 = 0.250$ ,  $\tau_2 = 1.0 \times 10^{-6}$ ;  $g_3 = 0.125$ ,  $\tau_3 = 1.0 \times 10^{-5}$ 。

## 4 工程算例

由于涉及到材料非线性和几何大变形,以及复杂的几何形状和载荷边界条件,求解绝大多数橡胶减振器问题都需要借助计算机实现。基于有限单元法的通用有限元软件将各种复杂结构离散为规则单元,逐渐成为该领域的研究趋势。笔者使用 ABAQUS 对工程中常用的三层橡胶减振器进行计算分析。

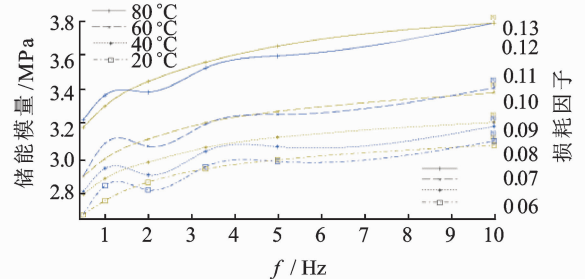
假设钢板为弹性材料,橡胶为黏弹性材料,分别对钢板和橡胶赋予材料属性<sup>[1]</sup>,如表 1 所示。使用二维四节点减缩单元 CPE4R 对钢板进行网格划分,使用二维四节点热耦合单元 CPE4TH 对橡胶进

行网格划分。



(a) DMA 试验系统

(a) DMA instrument



(b) DMA 试验曲线

(b) Curve of DMA test

图 2 DMA 试验

Fig. 2 DMA test

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

参数	钢板	橡胶
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^3$ )	7 850	1 130
弹性模量/MPa	$2.1 \times 10^5$	—
泊松比	0.3	—
线性热延展系数/( $10^{-6} \text{m} \cdot (\text{m} \cdot \text{K}^{-1})$ )	—	220
比热容/( $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ )	502	1 900
热传导系数/( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ )	70	0.14
WLF 系数	—	$C_1 = 17.4$ $C_2 = 51.6$
IHF 因数	—	0.1

对橡胶减振器下表面固定约束,对上表面施加正弦剪切载荷  $F = F_0 \sin \omega t$ ,  $F_0 = 20 \text{ kN}$ ,且有  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为振动频率。内外表面施加强制对流热边界条件  $8.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ <sup>[12]</sup>。蠕变应变容差 (creep/swelling/viscoelastic strain error tolerance, 简称 CETOL) 为最终蠕变应变率和初始蠕变应变率的最大差值,用于控制蠕变积分精度。兼顾计算精度和计算效率范围一般为  $1 \times 10^{-4}$  至  $1 \times 10^{-6}$  之间,这里取  $1 \times 10^{-4}$ 。建立橡胶减振器的二维平面有限元模型如图 3 所示。用获得的材料参数作为橡

胶材料初始状态,温度相关性由“时间-温度”等效原理的 Williams-Landel-Ferry(WLF)形式<sup>[32]</sup>,求解模型的温度分布和力学响应。

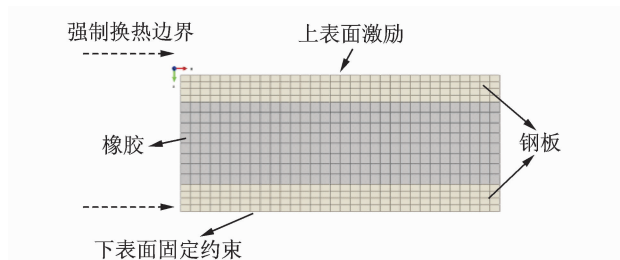


图3 橡胶减振器有限元模型

Fig. 3 FEM model of rubber isolator

## 5 结果与讨论

### 5.1 温度分布

橡胶减振器在进行减振过程中将机械能转化为热能,最直接的表现是温度升高。假设橡胶减振器在加载结束后温度分布达到稳态。以环境温度为20℃、频率为1 Hz为例说明橡胶减振器的温度分布状态,其他频率的温度分布趋势相似。钢板材料的热传导系数和比热容都较小,故温度未升高。橡胶材料的热传导系数小而比热容较大,受到周期载荷后发生较大变形,内部易形成高温积聚。与环境对流表面则由于较好的散热条件,未发生热量积聚,如图4所示。橡胶减振器升温试验可分为用热电偶测量的内部温度试验和各类测温仪的表面温度试验。前者测温准确,但试验复杂;后者易受环境热条件影响,但试验便捷。笔者采用测量表面温度进行验证。结果显示:0.5,1.0和1.5 Hz表面温度仿真值略高于试验值,差异来源于材料配方工艺、环境热对流边界等因素的综合影响;频率过快易出现气泡和裂纹,涉及到复杂的橡胶材料疲劳和断裂问题<sup>[33]</sup>,未进行2 Hz的加载和温度测试,如表2所示。本研究中选用橡胶试样为低迟滞的天然橡胶,但内部最高温度仍上升约20℃,因此在进行设计和校核时应考虑温度

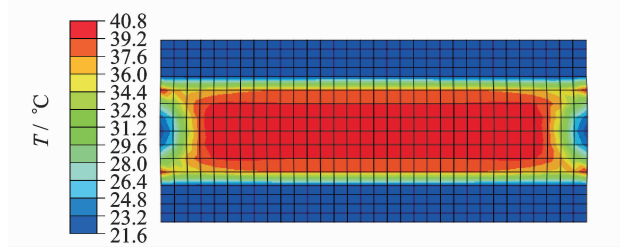


图4 温度云图(1Hz)

Fig. 4 Temperature distribution (1Hz)

引起足够重视,以防止由于热量积聚而造成结构性能下降和疲劳破坏。

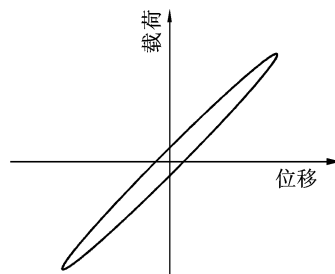
表2 橡胶减振器表面温度

Tab. 2 Surface temperatures of rubber isolator

$f$ / Hz	仿真值/℃	试验值/℃
0.5	20.9	20
1.0	21.6	20.7
1.5	22.0	21.7
2.0	25.1	—

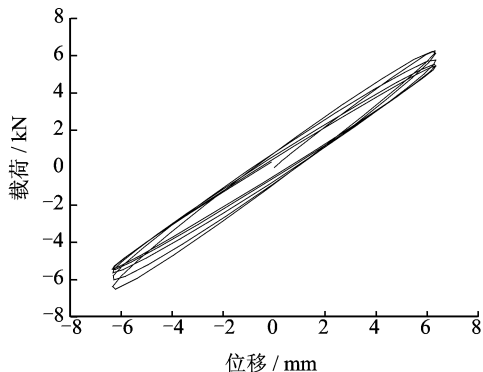
### 5.2 阻尼特性的变化

由于黏弹性材料的滞后特性,模型的“位移-载荷”曲线形成迟滞环,包围面积即为损耗能量。如不考虑非弹性效应,小振幅下由线性黏弹性本构模型计算各周期迟滞环重叠并呈狭长椭圆,如图5(a)所示。但在实际使用过程中,橡胶材料受到周期载荷作用微观表现为内部分子链的空间位置发生改变,主链被切断而发生软化,导致强度下降,并发生微小不可恢复变形,每个周期的迟滞环不重叠,如图5(b)所示。测定耗散能较为困难,同时为方便与已有文献试验<sup>[7]</sup>进行比较,根据 GB/T15168-2013<sup>[34]</sup>编制程序,将首末两个周期的迟滞环转化为等效动



(a) 未考虑热力耦合及非弹性的迟滞环

(a) Hysteresis loop without coupling and inelastic effect



(b) 考虑热力耦合和非弹性效应的迟滞环

(b) Hysteresis loop with coupling and inelastic effect

图5 不同模型的迟滞环

Fig. 5 Hysteresis loop of different models

刚度  $K$  和等效损耗因子  $\eta$ 。对比发现,仿真值  $K$  与试验值  $K'$ ,  $\eta$  和  $\eta'$  及损失率较接近,如表 3 所示。

表 3 橡胶减振器阻尼特性变化

Tab. 3 Change of damping characteristics of rubber isolator

状态	$K /$ ( $\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$K' /$ ( $\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$\eta / \%$	$\eta' / \%$
初始	8.936	8.653	30.0	32.6
终了	7.226	6.922	20.2	21.2
损失率%	19.1	20.0	32.6	35.0

橡胶材料的力学性能易受温度和频率影响,对频率为  $0 \sim 2 \text{ Hz}$ (环境温度  $20^\circ\text{C}$ ) 和环境温度为  $20 \sim 80^\circ\text{C}$ (振动频率  $1 \text{ Hz}$ ) 的橡胶减振器始末的耗能特性变化进行分析。在频率范围内,初始周期的耗能随频率增大而明显增大。显然,频率增大导致单位体积积累的损耗能量增加。经过长时间周期性载荷作用后,橡胶材料内部高分子之间的空间位置发生变化,长链之间取向改变,累积发生 IHF 的量在不断增加,最终耗散能的随频率虽有上升,但是随频率变化的敏感度降低,趋于水平直线,如图 6(a)所示。这与文献[35]得出在工程应用的正常限定范围内频率变化的影响可以忽略的结论相吻合。

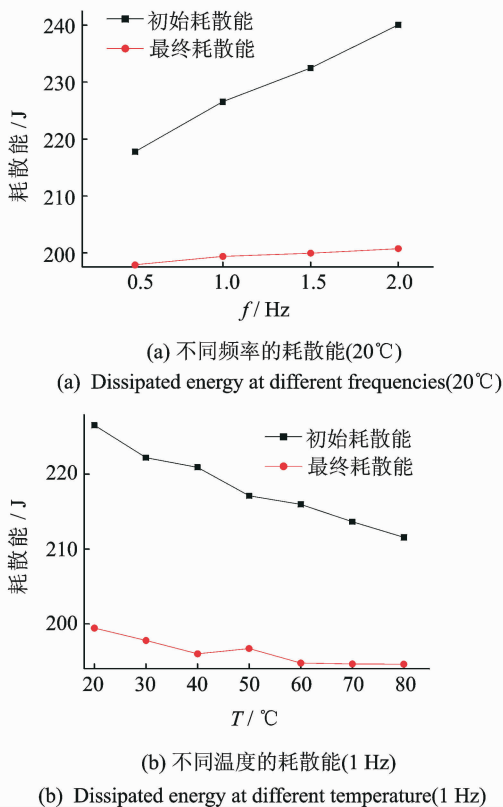


图 6 不同频率和温度的橡胶减振器耗散能

Fig. 6 Dissipation of rubber isolator at different frequencies and temperatures

温度升高使得橡胶分子链段的松弛时间变短,橡胶减振器响应外力作用的速度变快,因此初始耗散能量随温度变化呈下降趋势。由于温度范围在其正常使用范围内,所以下降趋势较为平缓。经过长时间周期载荷后,最终耗散能随温度升高呈下降趋势。由于耗散性能下降,最终耗散能对温度的敏感性明显下降,也几近水平直线,如图 6(b)所示。

## 6 结 论

1) 由于热力耦合和非弹性变形的影响,在周期载荷加载前后橡胶减振器的结构动刚度和损耗因子都有所下降。初始耗散能随频率增大而明显增大,随温度升高缓慢减小;最终耗散能对频率和温度变化不敏感,趋于稳定。

2) 温度云图显示高温区域位于结构中心,温度由内向外逐渐降低。频率为  $0.5 \text{ Hz}$  和  $1 \text{ Hz}$  的结构表面温度与环境温度相同,频率为  $1.5 \text{ Hz}$  的表面温度略高于环境温度。表面温度的仿真结果与试验值接近。

3) 本研究可为橡胶减振器阻尼性能变化的预测提供一种思路。由于条件限制,未对橡胶材料的非弹性热摩擦系数进行定量研究,今后将进一步研究不同类型橡胶材料的非弹性热摩擦特性。

## 参 考 文 献

[1] [美]詹特 A N. 橡胶工程:如何设计橡胶配件[M]. 张立群,田明,刘力,等译. 北京:化学工业出版社,2002: 77-78, 332-333.

[2] Christensen R M. Theory of viscoelasticity; an introduction[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 1984, 51(1): 292-292.

[3] Yi S, Ahmad M F, Hilton H H. Dynamic responses of plates with viscoelastic free layer damping treatment [J]. Journal of Vibration & Acoustics, 1996, 118 (3): 362-367.

[4] Kovalenko A D, Karnaukhov V G. On heat generation in viscoelastic bodies under periodic action[J]. International Applied Mechanics, 1969, 5(2):129-134.

[5] Bronowicki A. Constrained multi-layer damping; a semi-analytic solution [C] // Collection of technical papers-AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Honolulu, Hawaii; American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc,2007:23-26.

[6] Gandhi F, Remillat C, Tomlinson G, et al. Constrai-

- ed-layer damping with gradient polymers for effectiveness over broad temperature ranges[J]. *Aiaa Journal*, 2015, 45(8):1885-1893.
- [7] Bronowicki A J. Vibration isolator for large space telescopes[J]. *Journal of Spacecraft & Rockets*, 2012, 43(1):45-53.
- [8] Johnson A R, Chen T K. Approximating thermo-viscoelastic heating of largely strained solid rubber components[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 2005, 194(S2-5):313-325.
- [9] 张针粒, 李世其, 朱文革. 粘弹性阻尼材料动态力学性能温度谱模型[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(20):135-140.  
Zhang Zhenli, Li Shiqi, Zhu Wenge. Temperature spectrum model of dynamic mechanical properties for viscoelastic damping materials[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(20):135-140. (in Chinese)
- [10] 韦凯, 周昌盛, 王平, 等. 扣件胶垫刚度的温变性能对轮轨耦合随机频响特征的影响[J]. *铁道学报*, 2016(1):111-116.  
Wei Kai, Zhou Changsheng, Wang Ping, et al. Influence of temperature-dependent stiffness of rail pads on the frequency-domain random vibration of vehicle-track coupled system[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2016(1):111-116. (in Chinese)
- [11] Pešek L, Pust L, Šulc P. FEM modeling of thermo-mechanical interaction in pre-pressed rubber block[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 14(1): 3-11.
- [12] 贾志绚, 王军, 孙大刚, 等. 粘弹性悬架阻尼缓冲件温度场特性[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(3): 25-28.  
Jia Zhixuan, Wang Jun, Sun Dagang, et al. Characteristics of temperature field on damping buffers for viscoelastic suspensions[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(3): 25-28. (in Chinese)
- [13] 韩广文. 橡胶减振器动静态性能及寿命预测研究[D]. 青岛:青岛科技大学, 2016.
- [14] Oden J T. Discussion of linear and nonlinear analysis by conjugate analogy[J]. *Journal of the Structural Division*, 1967, 93(4): 27-46.
- [15] Holzapfel G A, Reiter G. Fully coupled thermomechanical behaviour of viscoelastic solids treated with finite elements[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1995, 33(7): 1037-1058.
- [16] Chrysochoos A, Maisonneuve O, Martin G, et al. Plastic and dissipated work and stored energy[J]. *Nuclear Engineering & Design*, 1989, 114(3): 323-333.
- [17] Pottier T, Toussaint F, Louche H, et al. Inelastic heat fraction estimation from two successive mechanical and thermal analyses and full-field measurements [J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2013, 38(1): 1-11.
- [18] Rittel D. On the conversion of plastic work to heat during high strain rate deformation of glassy polymers [J]. *Mechanics of Materials*, 1999, 31(2): 131-139.
- [19] Jean de C, Domingos A R. Numerical analysis of self-heating effects in viscoelastic dampers[C]// 20<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering. Brazil: [s. n.], 2009:15-20.
- [20] Ciambella J, Destrade M, Ogden R W. On the abaqus FEA model of finite viscoelasticity[J]. *Rubber Chemistry & Technology*, 2013, 82(2): 184-193.
- [21] Ciambella J, Paolone A, Vidoli S. A comparison of nonlinear integral-based viscoelastic models through compression tests on filled rubber [J]. *Mechanics of Materials*, 2010, 42(10): 932-944.
- [22] 胡小玲, 刘秀, 李明, 等. 炭黑填充橡胶超弹性本构模型的选取策略[J]. *工程力学*, 2014, 31(5): 34-42.  
Hu Xiaoling, Liu Xiu, Li Ming, et al. Selection strategies of hyperelastic constitutive models for carbon black filled rubber[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(5): 34-42. (in Chinese)
- [23] 龚科家, 危银涛, 叶进雄. 填充橡胶超弹性本构参数试验与应用[J]. *工程力学*, 2009, 26(6): 193-198.  
Gong Kejia, Wei Yintao, Ye Jinxiong. Constitutive parametric experiment of tire rubber hyperelastic laws with application hyperelastic laws with application[J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(6): 193-198. (in Chinese)
- [24] Park S W, Schapery R A. Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. part I—a numerical method based on Prony series[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 1999, 36(11): 1653-1675.
- [25] Taylor R L, Pister K S, Goudreau G L. Thermomechanical analysis of viscoelastic solids[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1969, 2(1): 45-59.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局; 中国国家标准化管理委员会. GB/T 2941-2006 橡胶物理试验方法试样制备和调节通用程序[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局; 中国国家标准化管理委员会. GB/T 528-2009 硫化橡胶或热塑性橡胶. 拉伸应力应变性能的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [28] American Society for Testing and Materials. ASTM E2254—2009 standard test method for storage modu-

lus calibration of dynamic mechanical analyzers [S]. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 2009.

[29] American Society for Testing and Materials. ASTM E2425—2005 standard test method for loss modulus conformance of dynamic mechanical analyzers [S]. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 2005.

[30] Fernanda M, Costa P, Ribeiro C. Parameter estimation of viscoelastic materials; a test case with different optimization strategies [C] // Numerical Analysis & Applied Mathematics Icaam: International Conference on Numerical Analysis & Applied Mathematics. Hilkidiki, Greece: American Institute of Physics, 2011: 771-774.

[31] Baumgaertel M, Winter H H. Determination of discrete relaxation and retardation time spectra from dynamic mechanical data[J]. Rheologica Acta, 1989, 28 (6): 511-519.

[32] Ferry J. D. Viscoelastic properties of polymers [M]. 3rd ed. New York: Wiley, 1980:287-288.

[33] 上官文斌, 邓建向, 余良渭, 等. 填充天然橡胶材料裂纹扩展模型的建模方法[J]. 振动、测试与诊断, 2016,36(1): 152-159.

Shangguan Wenbin, Deng Jianxiang, Yu Liangwei, et al. Modeling of fatigue crack growth for filled natural

rubber materials [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36 (1): 152-159. (in Chinese)

[34] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局; 中国国家标准化管理委员会. GB/T 15168—2013 振动与冲击隔离器静、动态性能测试方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

[35] 弗雷克利 P K, 佩恩 A R. 橡胶在工程中应用的理论与实践[M]. 杜承泽, 译. 北京: 化学工业出版社, 1985:61.



**第一作者简介:**王军,男,1982年7月生,博士生。主要研究方向为机械振动的控制与利用。曾发表《Prediction of heat accumulation of symmetrical rubber buffer on track-type bulldozer》(《Engineering Review》2017, Vol. 37, No. 3)等论文。

E-mail: wj3201239@163.com

**通信作者简介:**孙大刚,男,1955年4月出生,博士、教授。主要研究方向为工程车辆振动与噪声的阻尼控制。

E-mail: sdgbox@sina.com



## 欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为 EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价 30 元,全年 180 元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街 29 号 邮政编码:210016

电话:(025)84893332

传真:(025)84893332 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn

网址:http://zdcn.nuaa.edu.cn

