

航空航天装备

压剪混合型硅橡胶减振器动态高温工作特性

郭瑞毅¹, 石凤仪², 任玉柱¹, 涂春潮¹, 苏正涛¹

(1.中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2.天津航海仪器研究所, 天津 300131)

摘要: **目的** 归纳出高温范围内减振系统动态性能随温度变化的关系。**方法** 通过在特定温度条件下使用正弦扫频以及半正弦冲击试验, 测试一系列压剪型橡胶减振器振动以及冲击性能, 使用最小二乘法拟合得到此类减振器多个振动冲击性能与温度关系的经验公式。**结果** 在低于橡胶材料热分解温度的前提下, 短期内压剪型橡胶减振器的动态工作特征与工作温度有关, 与温度历程无关, 均可表示为温度的三参数函数。**结论** 随着温度的升高, 一阶谐振频率(ω_T)以及冲击响应幅值的绝对值(G_T)遵循一阶指数衰减函数关系, 放大倍数(D_T)与温度则遵循S型函数关系。

关键词: 减振器; 硅橡胶; 高温性能; 经验公式

中图分类号: TB123

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)06-0101-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.06.015

High-temperature Working Characteristics of Pressure Shear Hybrid Silicon Rubber Isolator

GUO Rui-yi¹, SHI Feng-yi², REN Yu-zhu¹, TU Chun-chao¹, SU Zheng-tao¹

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. Tianjin Navigation Instrument Research Institute, Tianjin 300131, China)

ABSTRACT: This paper aims to provide the correlation between dynamic performance and temperature in high temperatures. In a series of high temperature conditions, the vibration and impact performance of isolators are tested. Some empirical formulas are summarized through those results using the least square method. The test results show that the dynamic performance of pressure-shear rubber isolators are related to temperature rather than temperature history. Furthermore, the first-order resonance frequency (ω_T) and the absolute value of the impact response acceleration (G_T) follow the first-order exponential decay function relationship with the changing of temperature, and the amplification factor (D_T) follows the S-type function with the temperature.

KEY WORDS: isolator; silicone; high temperature performance; empirical formula

收稿日期: 2021-03-03; 修订日期: 2021-04-03

Received: 2021-03-03; Revised: 2021-04-03

基金项目: 民机科研资助项目(MJ-2015-G-082, MJ-2018-F-15); 国家配套资助项目(××××-16-020-5)

Fund: Supported by the Civil Aircraft Research Funding Project (MJ-2015-G-082, MJ-2018-F-15) and National Supporting Projects(××××-16-020-5)

作者简介: 郭瑞毅(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为材料科学与工程。

Biography: GUO Rui-yi (1989—), Male, Master, Research focus: materials science and engineering.

引文格式: 郭瑞毅, 石凤仪, 任玉柱, 等. 压剪混合型硅橡胶减振器动态高温工作特性[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 101-106.

GUO Rui-yi, SHI Feng-yi, REN Yu-zhu, et al. High-temperature working characteristics of pressure shear hybrid silicon rubber isolator[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(6): 101-106.

减振器通常可分为金属减振器、橡胶减振器、液弹减振器、空气弹簧、磁流变减振器等^[1-5]。橡胶减振器相比较于其他种类减振器,其兼具可靠性高、性价比高、结构形式可自由选择的特点。压剪型橡胶减振器作为一种平衡减振效率和耐久性能的橡胶减振器,更是被广泛应用于航空、航天、兵器、电子、建筑等领域^[6-9]。随着现代工业的信息化与智能化,常需要将精密设备应用于恶劣的环境条件之下,如航空发动机外壁所悬挂的电子设备就需要耐受高温强振动环境^[10]。由于金属材料的耐热性能更好,因此高温环境下对减振器的研究主要集中于金属减振器^[11]。近些年随着数据的积累以及材料性能的提升,橡胶减振器也逐步扩大了工作温度范围^[12-13]。然而由于高温条件依然会影响到橡胶材料的粘弹性特征^[14-15],从而影响减振器的动态工作性能,而工程上减振器的谐振频率、放大倍数等动态性能参数对减振器的选用十分重要,同时高温对于橡胶减振器动态性能影响程度的探究鲜有报道,因此研究高温对压剪型橡胶减振器动态性能的影响关系就显得十分必要。

1 温度对减振器性能影响的理论分析

根据统计模型的橡胶弹性理论,对于分子末端距 r ,符合 Gauss 分布的单个由 N 个长链分子组成的结构主伸长率为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的长链分子,在小变形 (r 远远小于其完全伸长的长度 nl) 条件下,弹性应变能函数 W_G 可以从构象熵的变化推导出:

$$W_G = \frac{1}{2} NkT(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (1)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度。应力可以从应变能函数求偏导得出,例如单轴拉伸条件下,交联橡胶的小位移应力 σ 应变 ε 关系可写为:

$$\sigma = 3 \frac{\rho RT}{M_c} \varepsilon \quad (2)$$

式中: ρ 为聚合物密度; R 为气体常数; $\overline{M_c}$ 为交联点间链的平均分子量。在大变形条件下, r 可能会接近 nl , 此时考虑长链分子的非 Gauss 统计特性,可给出单个链的力-位移关系为:

$$f = \frac{kT}{l} L^{-1} \left(\frac{r}{nl} \right) = \frac{kT}{l} L^{-1} \left(\frac{\lambda}{\sqrt{n}} \right) \quad (3)$$

式中反 Langevin 函数 $L^{-1}(r/nl)$ 定义为:

$$\frac{r}{nl} = \coth \beta - \frac{1}{\beta} = L(\beta), \beta = L^{-1} \left(\frac{r}{nl} \right) \quad (4)$$

由以上关系可知,单链的应力应变关系与温度有着密切的联系。而这种关系就会反映为宏观橡胶材料应力-应变的关系,也就是当认为橡胶为理想弹性体时,胡克常数 k 是受到温度影响的^[16-17]。

同时橡胶还需要考虑其粘性。橡胶材料的阻尼主要来源于分子扩散、构型变化、分子间内摩擦等物理

机制耗散动能。限于理论研究的局限,针对内阻尼的研究,只能在试验条件下测定特定材料的内阻尼,其同样表现出温度依赖性。例如在特定温度、位移与频率条件下,橡胶材料的动态阻尼 $\eta(T)$ 可以写为:

$$\eta(T) = \frac{\rho T}{\rho_0 T_0} a_T \eta(T_0) \quad (5)$$

式中: a_T 为移动因子; T_0 为参数温度^[17]。

从数学模型的角度出发,橡胶实际表现出粘弹性的特征模型的种类有很多,这些模型均为弹簧、粘壶、摩擦板等基本单元的串联及并联结构。对于最简单的 Kelvin 模型(弹簧、粘壶并联模型),通过其将质量为 m 的质量块连接在固定基座上所组成的被动减振系统的谐振频率 ω 为:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{c^2}{4m^2}} \quad (6)$$

由式(6)可知,减振器的谐振频率与材料的弹性和粘性均有关系。 k 与 c 均为温度的函数,因此谐振频率与温度密切相关。对于广义 Maxwell 模型等更为复杂的粘弹性模型,谐振频率与温度的关系就变得更加复杂^[18]。

其实对于将橡胶作为粘弹性体进行减振的被动减振系统,温度对于其的影响并不完全体现在谐振频率这一个方面,温度对整个传递函数均有影响。例如采用并联弹簧刚度为 k' 、串联弹簧刚度为 k'' 的 Maxwell 模型时,系统的绝对传递函数 μ_F 为:

$$\mu_F = \frac{1 + 4 \left(\frac{N+1}{N} \right)^2 \xi^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right)^2 + \frac{4}{N^2} \xi^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \left(N+1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right)^2}} \quad (7)$$

其中无阻尼固有频率 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$, 阻尼比 $\xi = \frac{c}{c_{cr}}$,

刚度比 $N = \frac{k''}{k'}$, 临界阻尼系数 $c_{cr} = 2\sqrt{\frac{k}{m}}$ ^[19]。温度会影响 k' 、 k'' 、 c_{cr} 和 c , 进而影响式(7)中的几乎每一个参数,可见温度对于减振系统传递函数的影响是十分复杂的。

温度对于含阻尼系统冲击过程的影响同样也是极其复杂。首先系统的质量、阻尼、弹性刚度、冲击波形、冲击持续时间等参量均会影响到冲击过程中系统的最大加速度值。例如对于持续时间为 τ 的短时间矩形波冲击情况,被缓冲物的最大加速度与系统阻尼比 ξ 以及无因次时间 $\omega_n \tau$ 有关。这些参量与温度有关,从而在不同温度下对系统冲击过程的最大加速度产生影响。

综上所述,由于温度对于减振系统影响的复杂性,即使知道某一温度点下减振系统的动态性能,重要理论推导其他温度点下减振器动态性能的精确定解,

也存在诸多困难。现实中要想获得减振系统不同温度下的动态性能，需要进行大量的试验。但这些动态性能若可以表示为温度的某种函数，那么就会极大地减少试验量的需求。

2 试验

2.1 试件

JZQ-1、JZQ-2、JZQ-3 减振器，均为北京航空材料研究院产品，额定载荷分别为 400、500、600 g。

以 JZQ-1 减振器（见图 1）为例，深色部分为橡胶，其余部分为金属，两者之间使用共硫化方式进行粘接，因此在振动过程中相互之间不存在滑动摩擦。针对此结构进行有限元分析，当底部金属件与内部金属套筒之间沿着 z 向（轴向）发生 1 mm 相对位移时，各部分的应变如图 2 所示。由图 2 可知，金属材料由于模量远大于橡胶材料，基本不发生应变，橡胶体则存在着明显的 y 向正应变以及 z 方向的切应变，因此此类减振器被称为压减混合型减振器。这类减振器的动态性能则主要由橡胶材料的拉压及剪切性能影响，高温条件下橡胶材料力学性能的变化必然造成减振器动态性能的变化。

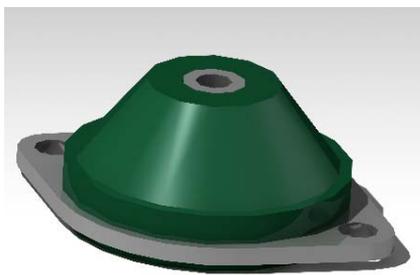


图 1 JZQ-1 减振器轴向视图
Fig.1 Axial view of JZQ-1 isolator

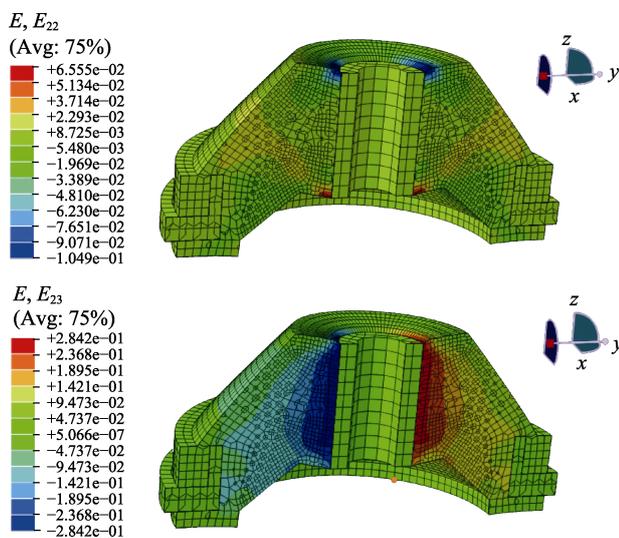


图 2 z 方向 1 mm 压缩位移下仿真应变云图
Fig.2 Simulated strain nephogram under 1 mm compression displacement in z direction

2.2 试验设备

试验所用设备为：DC-4000-40 电动振动试验系统，苏州苏试实验仪器股份有限公司；ETHV-1200-70-30H 恒温恒湿试验箱，巨孚仪器工业股份有限公司；DMA450+动态热机械分析仪，法国 01Db- Metravib 公司。

2.3 试验方法

DMA 试验条件：升温速率为 2 °C/min，频率为 1 Hz，位移为 0.5 mm。

振动试验条件：试验类型为 1g 正弦扫频试验，试验速度为 5 min 完成单程 10~2000 Hz 扫频试验。

冲击试验条件：半正弦冲击波形，冲击量级为 10g，冲击脉宽 11 ms。

试验方法及测量参数定义：将减振器安装在模拟工装上（如图 3 所示），并将工装固定在测试振动台上。将恒温恒湿箱调节至指定温度（ T ），待温度稳定后，保温 1 h。之后进行振动试验，测定被减振系统在该温度下的一阶谐振频率（ ω_T ）以及输入、响应振动量级，同时定义一阶谐振频率下振动响应与振动输入之比为放大倍数（ D_T ）。之后再行冲击试验，测量被减振系统在该温度下冲击响应幅值的绝对值（ G_T ）。



图 3 JZQ-1 减振器安装方式
Fig.3 The installation of the JZQ-1 isolator

3 试验结果及分析

针对橡胶材料的 DMA 分析如图 4 所示。由图 4 可知，无论从储能模量（ E' ）、损耗模量（ E'' ），还是损耗角正切（ $\tan\delta$ ）的角度出发，减振器所使用的弹性体材料在 -70~150 °C 均无明显相变的迹象，也就是表现为橡胶态。因此在实际需求的高温范围内，减振器的性能变化主要由温度对所使用弹性材料橡胶态粘弹性性能的影响造成。最终选择 20、50、70、85、100、120 °C 进行扫频试验以及冲击试验，从而探究高温对减振器谐振频率、放大倍数和冲击响应的影响。

3.1 温度对谐振频率的影响

不同温度点 3 种减振器的谐振频率与温度的关

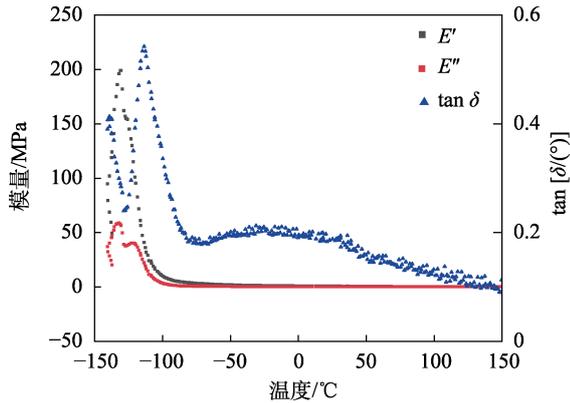


图4 橡胶材料-140~150 °C粘弹性性能
Fig.4 Viscoelasticity of rubber material at -140~150 °C

系如图5所示。对于选择的3种不同额定载荷的减振器，其谐振频率随着温度的升高不断降低，并且呈现出收敛性。这一特性是由于随着温度的升高，橡胶材料更加趋向于高熵的卷曲状态，平衡高弹模量增高；同时由于温度升高，形变发生的松弛时间缩短，构象的转变更加迅速。综合两种原因，对于橡胶材料处于非平衡态的减振器，其表现出复杂的刚度特征。经过尝试，利用式(8)对这3种减振器不同温度下的一阶谐振频率进行拟合，其拟合常数以及拟合校验值 P 见表1。由于拟合中原假设为式(8)与原试验点无关系，3种减振器拟合曲线与试验点的 P 值均远远小于0.01，因此否定原假设。式(8)与原试验点关系极其显著，从而此拟合成立。

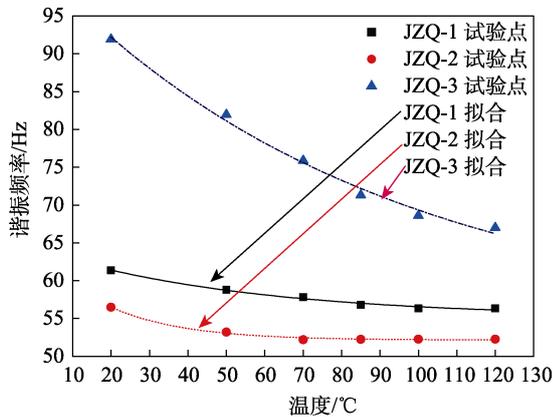


图5 试验减振器的谐振频率与温度的关系
Fig.5 The relationship between resonance frequency and temperature of tested isolator

表1 试验减振器谐振频率与温度的关系式拟合常数以及 P 值

Tab.1 Fitted constant and P value of the relationship between the resonance frequency and temperature of the tested isolator

产品名称	ω_m	a	b	P
JZQ-1	55.150	9.0745	53.924	5.772×10^{-8}
JZQ-2	52.151	12.375	19.170	2.911×10^{-8}
JZQ-3	54.047	47.937	87.555	1.316×10^{-6}

$$\omega_T = \omega_m + a \times e^{-T/b} \tag{8}$$

式中： ω_m 、 a 、 b 为常数； T 为温度； ω_T 为 T 温度点下的谐振频率。

3.2 温度对放大倍数的影响

温度对减振器的放大倍数也有着明显的影响。由试验结果可知，随着温度的升高，减振器的放大倍数不断增大，并且增加趋势呈现出“S”型。这是由于随着温度的升高，分子链构型的转变越来越容易，同时分子链中有序化结构的减少，使得更多的链段参与了构型的变化，这两种效果共同影响橡胶材料的粘弹性行为。最终经验性地使用式(9)对这种S型函数进行拟合。

$$D_T = \frac{k}{1 + e^{a-bT}} \tag{9}$$

式中： k 、 a 、 b 为常数； T 为温度； D_T 为 T 温度下减振器的放大倍数。

这3种减振器的拟合曲线如图6所示，其拟合常数以及拟合校验值 P 见表2。通过 P 值可知，式(9)与原试验点关系极其显著，从而此拟合成立。

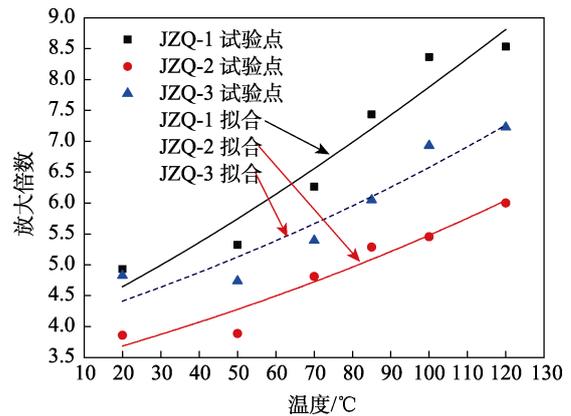


图6 试验减振器的放大倍数与温度的关系
Fig.6 The relationship between magnification and temperature of the tested shock isolator

表2 试验减振器放大倍数与温度的关系式拟合常数以及 P 值

Tab.2 Fitted constant and P value of the relationship between the magnification and temperature of the tested isolator

产品名称	k	a	b	P
JZQ-1	20.272	1.4029	0.009 50	2.228×10^{-4}
JZQ-2	179.19	3.9646	0.005 08	1.156×10^{-4}
JZQ-3	346.53	4.4520	0.005 07	2.266×10^{-4}

3.3 温度对冲击响应的影响

温度对冲击响应的影响如图7所示，如同之前的2个参量，通过 P 值(见表3)检验的方式可以证明：对于列举的3种减振器，温度 T 对冲击响应幅值的绝对值 G_T 的影响与公式(10)的关系极其显著。

$$G_T = G_m + a \times e^{-T/b} \quad (10)$$

其中 G_m 、 a 、 b 为常数。

式 (8) 和式 (10) 的函数形式完全一致，而与式 (9) 的函数形式相差很多。也就是温度 (T) 对谐振频率 (ω_T) 以及冲击响应幅值的绝对值 (G_T) 的影响类似，而对放大倍数 (D_T) 的影响完全不同。

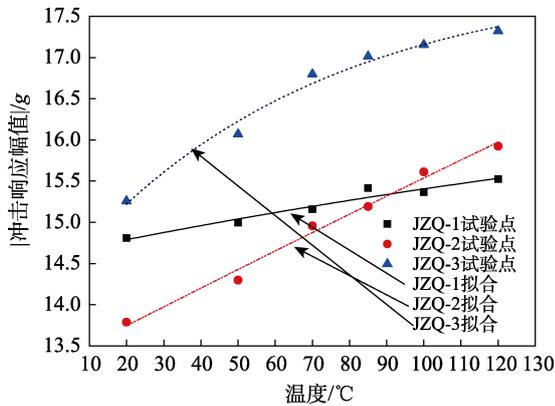


图 7 试验减振器的冲击响应幅值的绝对值与温度的关系
Fig.7 The relationship between the absolute value of shock response acceleration and temperature of test shock isolator

表 3 试验减振器冲击响应幅值的绝对值与温度的关系式拟合常数以及 P 值

Tab.3 The fitted constant and P value of the relationship between the absolute value of the shock response acceleration and the temperature of the tested shock isolator

产品名称	G_m	a	b	P 值
JZQ-1	17.336	-2.729	289.407	8.921×10^{-8}
JZQ-2	51.255	-37.971	1634.509	2.276×10^{-7}
JZQ-3	17.990	-3.737	66.606	2.672×10^{-7}

由于橡胶材料为粘弹性材料，温度对 ω_T 、 G_T 和 D_T 的影响可以简化为温度对橡胶材料粘性以及弹性的影响。从分子角度出发，橡胶材料的粘性来自于范德华力、分子间内摩擦、构型转变等等因素；而橡胶材料的弹性来自于分子链构型变化所产生的熵弹性，这些分子层面的很多因素均会受到温度的影响。对于减振器， ω_T 、 G_T 和 D_T 虽然都可以表示为弹性与粘性的方程，但它们的决定因素却各不相同，其中放大倍数 D_T 更主要取决于粘性，而对于谐振频率 ω_T 和冲击响应幅值的绝对值 G_T ，弹性和粘性均有重要影响，因此它们对于温度的关系式也存在明显的不同。

3.4 短期内减振器动态性能与温度历程的关系

在进行高温试验前后，均收集了减振器在 20 °C 条件下的动态性能，见表 4。从表 4 中可知，此 3 种减振器在进行高温试验前后，相同温度下，动态性能变化的绝对值均小于 6%，可以认为温度对减振器动态性能的影响是可逆的。这主要是由于短期内，

120 °C 以内的高温无法对硅橡胶材料造成足以影响其宏观性能的老化，因此针对此系列减振器在 120 °C 以下橡胶材料的力学行为，可以使用特定的方程进行表示，而与温度历程无关。

表 4 高温试验前后减振器在 20 °C 条件下的动态性能比较
Tab.4 Dynamic performance of isolator at 20 °C before and after high temperature test

样品名称	谐振频率变化率/%	放大倍数变化率/%	冲击响应幅值的绝对值变化率/%
JZQ-1	-2.82	-0.78	-1.54
JZQ-2	-1.88	1.76	-5.8
JZQ-3	2.01	3.16	-3.82

4 结论

通过对多种型号压剪混合型减振器高温性能进行研究，利用统计的方式得到了以下结论：

对于压剪型橡胶减振器，其 ω_T 和 G_T 与温度在 20~100 °C 符合一阶指数衰减函数关系。

对于压剪型橡胶减振器，其 D_T 与温度在 20~120 °C 符合 S 型函数关系。

在高分子材料不发生分解的前提下，短期内压剪型橡胶减振器的动态工作特征只与温度有关，与温度历程无关。

参考文献：

[1] 王平, 张国玉, 高玉军, 等. 金属橡胶减振器在机载光电吊舱复合减振系统中的应用[J]. 振动与冲击, 2014, 33(5): 193-199.
WANG P, ZHANG G Y, GAO Y J, et al. Application of metal-rubber dampers in vibration reduction system of airborne electro-optical pod [J]. Journal of vibration and shock, 2014, 33(5): 193-199.

[2] 李峙岳, 朱如鹏, 李苗苗, 等. 基于鬃毛摩擦理论的环形橡胶减振器动态迟滞特性模型[J]. 航空动力学报, 2018, 33(5): 1136-1143.
LI Z Y, ZHU R P, LI M M, et al. Dynamic hysteresis characteristics model of rubber damping ring based on bristle friction theory[J]. Journal of aerospace power, 2018, 33(5): 1136-1143.

[3] 吕振华, 李世民. 筒式液阻减振器动态特性模拟分析技术的发展[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(11): 1532-1536.
LV Z H, LI S M. Simulation techniques for nonlinear dynamic characteristics of telescopic hydraulic dampers[J]. J Tsinghua Univ (sci & tech), 2002, 42(11): 1532-1536.

[4] 徐国敏, 周炜, 何琳, 等. 新型长方体形囊式空气弹簧垂向动态特性研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(7): 247-253.

- XU G M, ZHOU W, HE L, et al. Vertical dynamic characteristics of cuboid type air springs[J]. *Journal of vibration and shock*, 2018, 37(7): 247-253.
- [5] 胡志坚, 夏雷雷, 孙立志, 等. 磁流变纳米复合材料减振器的磁路分析[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(12): 260-264.
- HU Z J, XIA L L, SUN L Z. Magnetic circuit analysis of magnetorheological anocomposite shock absorber[J]. *Journal of vibration and shock*, 2018, 37(12): 260-264.
- [6] 庄表中, 李振华, 王惠明, 等. 轨道减振器的减振效果分析[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(8): 237.
- ZHUANG B Z, LI Z H, WANG H M, et al. Analysis of the effect of track damper[J]. *Journal of vibration and shock*, 2010, 29(8): 237.
- [7] 郭瑞毅, 马利宁, 涂春潮, 等. 一种惯性导航用减振器的低温工作特性[J]. *导航与控制*, 2018, 17(5): 88-91.
- GUO R Y, MA L N, TU C C, et al. Low-temperature working characteristics of a damper applied for inertial navigation[J]. *Navigation and control*, 2018, 17(5): 88-91.
- [8] 金著, 何琳, 赵应龙, 等. 寿命周期构型变化类橡胶减振器使用寿命评估[J]. *振动、测试与诊断*, 2018, 38(2): 248-253.
- ZHUANG B Z, LI Z H, WANG H M, et al. Analysis of the effect of track damper[J]. *Journal of vibration, measurement & diagnosis*, 2018, 38(2): 248-253.
- [9] HYUN S K, JOO W K. Optimal design of smart mid-story isolated control system for a high-rise building[J]. *International journal of steel structures*, 2019, 19(6): 1988-1995.
- [10] 邓吉宏, 王轲, 陈国平, 等. 金属橡胶减振器用于发动机安装减振的研究[J]. *航空学报*, 2008, 29(6): 1581-1585.
- DENG J H, WANG K, CHEN G P, et al. Study on effect of engine installation metal rubber damper[J]. *Acta aeronautica et astronautica sinica*, 2008, 29(6): 1581-1585.
- [11] 侯军芳, 白鸿柏, 李冬伟, 等. 高低温环境金属橡胶减振器阻尼性能试验研究[J]. *航空材料学报*, 2006, 26(6): 50-54.
- HOU J F, BAI H B, LI D W, et al. Test research of damping performance of metal rubber damper at high-low temperature[J]. *Journal of aeronautical materials*, 2008, 29(6): 1581-1585.
- [12] TANG N, SOLTANI P, PINNA C, et al. Ageing of a polymeric engine mount investigated using digital image correlation[J]. *Polymer Testing*, 2008, 71: 137-144.
- [13] KRISTOFER J B. Improvements in mounting aerofoil blades: UK, GB 2472572[P]. 2011-11-24.
- [14] 张颖. 高阻尼硅橡胶的制备与性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- ZHANG Y. Synthesis and research on properties of high damping silicone rubber[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [15] 陈波, 罗晓锋, 黄强, 等. 三氧化二铝和硅烷偶联剂对导热高温硫化硅橡胶性能的影响[J]. *橡胶工业*, 2019, 66(1): 32-35.
- CHEN B, LUO X F, HUANG Q, et al. Effects of Al₂O₃ and silane coupling agents on properties of thermally conductive HTV silicone rubber[J]. *China rubber industry*, 2019, 66(1): 32-35.
- [16] 杨挺青, 罗文波, 危银涛, 等. 黏弹性理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 295-296.
- YANG T Q, LUO W B, WEI Y T, et al. Viscoelastic theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2004: 295-296.
- [17] 金日光, 华幼卿. 高分子物理[M]. 第二版. 北京: 化学工业出版社, 2000: 134-135, 165-167.
- JING R G, HUA Y Q. Polymer physics[M]. The second edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2000: 134-135, 165-167.
- [18] 朱石坚, 楼京俊, 何其伟, 等. 振动理论与隔振技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 3-5.
- ZHU S J, LOU J J, HE Q W, et al. Vibration theory and vibration isolation technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 3-5.
- [19] 丁文镜. 减振理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 50-52.
- DING W J. Vibration reduction theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988: 50-52.