

应用理论

隔振橡胶材料基于简单应变模式的蠕变特性研究

荣继纲^{1,2}, 黄友剑², 卜继玲², 杨 军^{1,2*}

(1.湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007; 2.株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要:对隔振橡胶材料的单轴拉伸应力松弛试验数据进行归一化处理,应用Prony级数模型对其应力松弛试验数据进行拟合,获得对应的粘弹本构参数。将表征粘弹特性的Prony级数因子引入Ogden超弹本构方程,获得隔振橡胶材料基于时间效应的本构方程,进而分析单轴拉伸、双轴拉伸和平面拉伸模式的蠕变特性,最后采用沙漏弹簧进行蠕变仿真与试验验证。该蠕变仿真预测方法为隔振橡胶材料的粘弹试验、蠕变计算和工程应用提供一种新思路。

关键词:隔振橡胶材料;蠕变特性;粘弹特性;应变模式;超弹本构方程;Prony级数模型;沙漏弹簧

中图分类号:TQ330.1⁺2

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2022)07-0506-06

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2022.07.0506



OSID 开放科学标识码
(扫码与作者交流)

橡胶材料具有良好的粘弹特性,因此被广泛应用于轨道车辆、汽车、工程机械以及减隔振领域^[1-6]。橡胶材料的粘弹行为是橡胶分子内部滑移摩擦而导致的应变滞后于应力的结果。在静态时,橡胶材料的粘弹特性表现为与时间相关的应力松弛和蠕变行为,即模量随时间衰减。为表征隔振橡胶材料这一复杂的粘弹行为,R. K. LUO等^[7]在本构模型中引入蠕变的强化和软化系数,以描述橡胶材料的蠕变特性。L. M. YANG等^[8-9]提出了基于Yeoh本构方程的粘弹模型,并将其应用在冲击仿真中。B. BERNSTEIN等^[10]对不可压缩的固体和流体的粘弹本构方程进行了推导,构建了适用于橡胶材料粘弹特性的积分型BKZ本构模型。

本工作基于橡胶材料的应力松弛试验,构建复合粘弹模型,完成一种包装用隔振橡胶材料的粘弹本构参数拟合,并将表征粘弹特性的Prony级数因子引入Ogden超弹本构方程,以期对该橡胶

材料在简单应变模式下的粘弹行为和沙漏弹簧的蠕变规律进行仿真计算和试验验证。

1 典型应变水平的应力松弛试验

1.1 单轴拉伸应力松弛试验

为研究包装用隔振橡胶材料的静态粘弹特性,探讨其粘弹行为以及表征粘弹行为的本构方程,对该材料进行单轴拉伸应力松弛试验。试验设备为EPLEXOR 500N型动态热力学分析仪(见图1),试样为哑铃形(见图2),试验温度为23℃,应力松弛时间为2 000 s,应变为0.1,0.25,0.5,1.0,1.5和2.0。试验得到不同应变下的应力松弛曲线,如图3所示。

1.2 试验数据归一化

为判断不同应变工况下橡胶材料的粘弹行为是线性还是非线性,对测试获得的应力松弛数据进行基于时间的模量数据归一化处理,即计算不同时间下弹性模量(E_t)与初始弹性模量(E_0)之比:

作者简介:荣继纲(1976—),男,湖南岳阳人,湖南工业大学博士研究生,主要从事橡胶减振技术研究。

*通信联系人(yangjun@csrzic.com)

引用本文:荣继纲,黄友剑,卜继玲,等.隔振橡胶材料基于简单应变模式的蠕变特性研究[J].橡胶工业,2022,69(7):506-511.

Citation: RONG Jigang, HUANG Youjian, BU Jiling, et al. Research on creep characteristic of damping rubber material on simple strain mode[J]. China Rubber Industry, 2022, 69(7): 506-511.



图1 试验装置
Fig. 1 Test device



图2 试样
Fig. 2 Samples

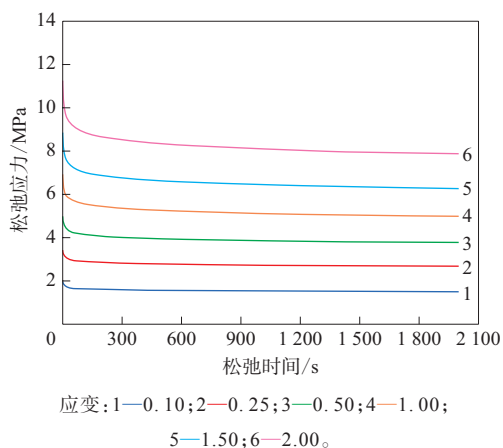
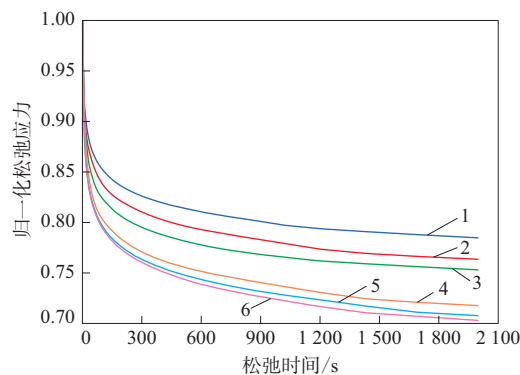


图3 不同应变下的应力松弛曲线
Fig. 3 Stress relaxation curves at different strains

$$E_{N(i)} = \frac{E_i}{E_0}$$

归一化后的应力松弛曲线如图4所示。从图4可以看出:应变在0.10~2.00这一应变区间,该橡胶材料的粘弹行为是非线性的;应变为0.25与0.50时,应力松弛曲线几乎可以重合,其粘弹行为可视为近似线性;应变为1.00与1.50时,其粘弹行为也可视为近似线性;当应变为0.10时,其粘弹行



注同图3。

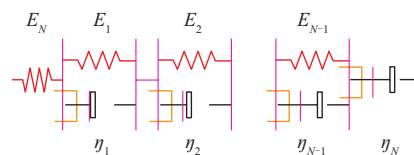
图4 归一化应力松弛曲线
Fig. 4 Normalized stress relaxation curves

为明显独立于其他应变水平。

2 粘弹本构模型及其参数拟合

2.1 粘弹本构模型

隔振橡胶材料的粘弹行为可抽象为弹性行为与粘性行为的复合。当橡胶材料承受小应变时,橡胶材料的粘弹性可视为遵从胡克定律的线性弹性行为和服从牛顿定律的线性粘性行为^[11-13]。目前描述橡胶材料粘弹特性的本构模型有Maxwell模型和Kelvin模型,但是这些单一模型无法准确表征隔振橡胶材料的粘弹行为。为此,将Kelvin模型和Maxwell模型进行组合,构建一组由 $(N-1)$ 个Kelvin模型单元和1个Maxwell模型单元组合而成的Prony级数模型(见图5)。



E_1 — E_{N-1} 和 η_1 — η_{N-1} 分别表示 $(N-1)$ 个Kelvin模型单元的弹簧模量和粘壶系数, E_N 和 η_N 分别表示Maxwell模型单元的弹簧模量和粘壶系数。

图5 Prony级数模型示意

Fig. 5 Diagram of Prony series model

为表征隔振橡胶材料基于时间相关性的蠕变或松弛行为,其松弛弹性模量的Prony级数方程可表述为

$$G(\tau) = G_0 \left[1 - \sum_{i=1}^N g_i^p (1 - e^{-\tau/d_i^p}) \right]$$

对上式两边同除以 G_0 ,则Prony级数可表示

为一个无维度的缩放因子 $[P(\tau)]$

$$P(\tau) = \frac{G(\tau)}{G_0} = 1 - \sum_{i=1}^N g_i^p (1 - e^{-\tau/\tau_i^p})$$

式中, G_0 和 $G(\tau)$ 分别为初始模量和时间为 τ 的模量, g_i^p 和 τ_i^p 均为材料参数。

根据无维度的缩放因子, 选择Ogden-3超弹本构方程及其参数来表征隔振橡胶材料的超弹性。Ogden-3超弹本构方程参数见表1。

表1 Ogden-3超弹本构方程参数
Tab. 1 Parameters of Ogden-3 hyperelastic constitutive equation

i	u_i	a_i
1	1.289	2.498
2	-0.987	2.813
3	4.372×10^{-5}	-7.986

注: i 为阶数, u_i 和 a_i 表征弹性行为参数。

2.2 粘弹本构参数拟合

借助有限元分析软件Abaqus中的Evaluate Material模块, 设置初始应变为0.5, 用Prony级数模型进行拟合, 得到隔振橡胶材料不同级数(N)下归一化模量-时间拟合曲线, 如图6所示。

从图6可以看出: 当 N 为1时, 拟合效果较差; 当 N 为2时, 拟合效果较好; 当 N 为3时, 拟合未能满足收敛性条件, 拟合失败; 当 N 为4时, 拟合效果达到最佳。当 N 为4时Prony级数模型的1—4阶等效剪切模量分别为 -6.081×10^{-3} , 9.4862×10^{-2} , 7.1576×10^{-2} 和 7.9298×10^{-2} , 等效松弛时间分别为0.3426, 3.8764, 46.457和673.10。

3 简单应变模式下的蠕变特性

3.1 简单应变模式下的粘弹本构方程

隔振橡胶材料的简单力学特性包括单轴拉伸、双轴拉伸和平面拉伸特性。为获得简单应变模式下隔震橡胶材料的蠕变行为, 将表征静态粘弹特性的Prony级数因子代入Ogden- N 超弹本构方程, 可得到基于时间效应的应变能密度(U)方程。

$U =$

$$\sum_{i=1}^N \frac{2G_0 \left[1 - \sum_{j=1}^M g_j^p (1 - e^{-\tau/\tau_j^p}) \right]}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3)$$

对于单轴拉伸模式, $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_1^{-1/2}$, 其应变能

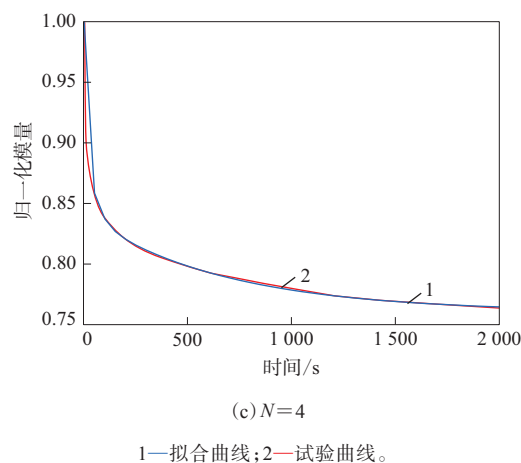
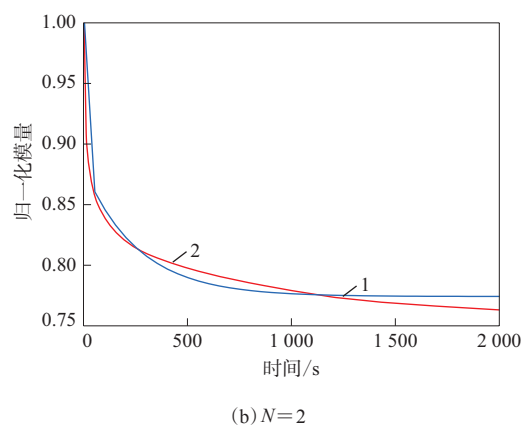
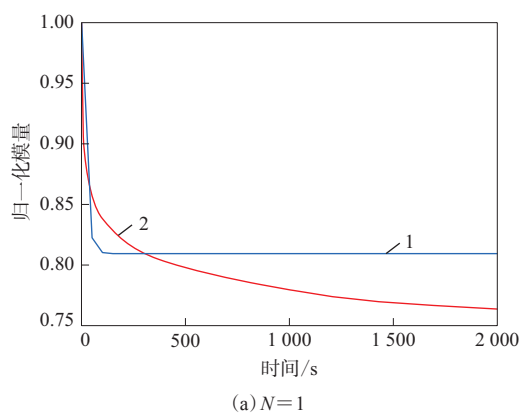


图6 不同 N 下归一化模量-时间拟合与试验曲线

Fig. 6 Normalized modulus-time curves of fitting and testing under different N

密度函数公式可表示为

$U =$

$$\sum_{i=1}^N \frac{2G_0 \left[1 - \sum_{j=1}^M g_j^p (1 - e^{-\tau/\tau_j^p}) \right]}{\alpha_i^2} [\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + 2\bar{\lambda}_1^{(-\frac{\alpha_i}{2})} - 3]$$

对于平面拉伸模式, $\lambda_2 = 1, \lambda_3 = \lambda_1^{-1}$, 其应变

能密度函数公式可表示为

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2G_0 \left[1 - \sum_{j=1}^M g_j^p (1 - e^{-\tau/\tau_j^p}) \right]}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_1^{-\alpha_i} - 2)$$

对于双轴拉伸模式, $\lambda_2 = \lambda_1, \lambda_3 = \lambda_1^{-2}$, 其应变能密度函数公式可表示为

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2G_0 \left[1 - \sum_{j=1}^M g_j^p (1 - e^{-\tau/\tau_j^p}) \right]}{\alpha_i^2} (2\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_1^{-2\alpha_i} - 3)$$

式中, λ_1, λ_2 和 λ_3 分别为橡胶在 X, Y 和 Z 方向上的伸长率。

3.2 简单应变模式下的蠕变计算

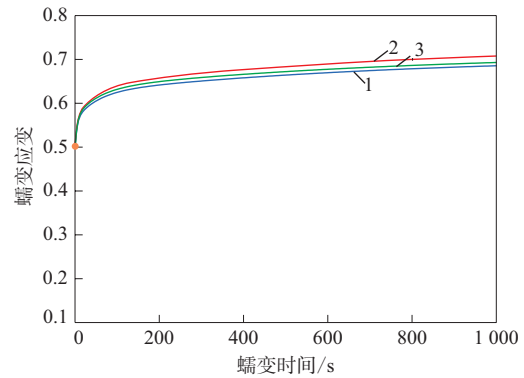
为研究不同初始应变下隔振橡胶材料单轴拉伸、双轴拉伸和平面拉伸模式蠕变应变随时间的变化规律, 特设置3个初始应变水平, 即初始应变为0.5、1.0和2.0, 以观察不同应变水平对蠕变量的影响。当初始应变分别为0.5、1.0和2.0时, 应用3种模式下的应变能密度函数公式, 可得到隔振橡胶材料在单轴拉伸、双轴拉伸和平面拉伸模式下经历1 000 s累计发生的蠕变量, 如图7所示。

从图7可以看出: 当初始应变为0.5时, 3种模式的蠕变应变几乎相当, 且双轴拉伸模式的蠕变应变介于平面拉伸与单轴拉伸模式之间; 当初始应变为1.0时, 单轴拉伸模式的蠕变应变小于平面拉伸模式的蠕变应变, 但二者几乎相当, 因此可用单轴拉伸模式的蠕变或松弛数据代替平面拉伸模式的剪切蠕变或松弛数据; 当初始应变为2.0 (大应变) 时, 双轴拉伸模式的蠕变应变远小于平面拉伸和单轴拉伸模式的蠕变应变, 且单轴拉伸和平面拉伸模式的蠕变曲线几乎重合。

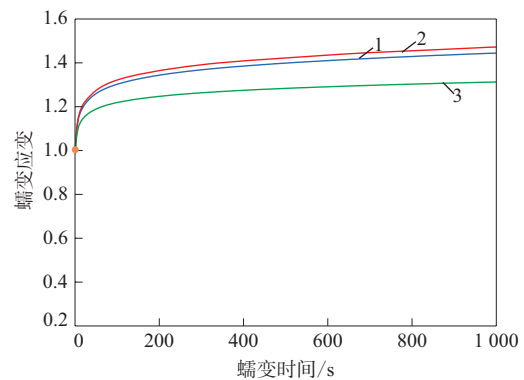
同理可计算不同初始应变下, 单轴拉伸、双轴拉伸和平面拉伸模式在经历1 000 s时的蠕变应变 (见图8)。从图8可以看出: 初始应变越大, 蠕变应变也越大; 单轴拉伸模式与平面拉伸模式的蠕变应变几乎相同; 在大应变工况下, 双轴拉伸模式的蠕变应变要明显小于其他2种拉伸模式的蠕变应变, 表明隔振橡胶材料采用双轴拉伸模式具有较强的抗蠕变能力。

4 沙漏弹簧的蠕变仿真与试验验证

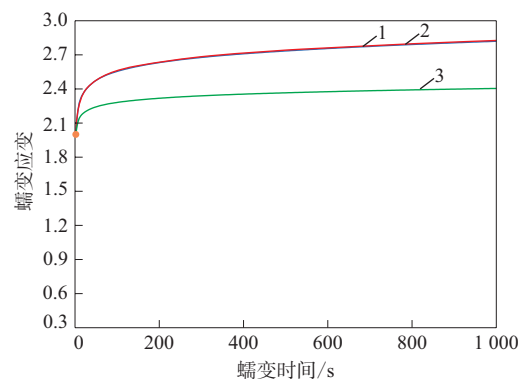
沙漏簧是一种橡胶/金属复合的厚制品橡胶



(a) 初始应变为0.5



(b) 初始应变为1.0



(c) 初始应变为2.0

拉伸模式: 1—单轴拉伸; 2—平面拉伸; 3—双轴拉伸。

图7 不同初始应变下3种拉伸模式的蠕变曲线
Fig. 7 Creep curves of three tensile modes under different initial strains

减振元件, 可承受压缩载荷^[14]。长时间压缩承载的过程中, 会表现出位移随时间渐进式增大的趋势。为设计和控制沙漏弹簧这一蠕变行为, 对沙漏弹簧进行仿真建模, 借助有限元分析软件Abaqus软件平台的static/general模块, 分别选用

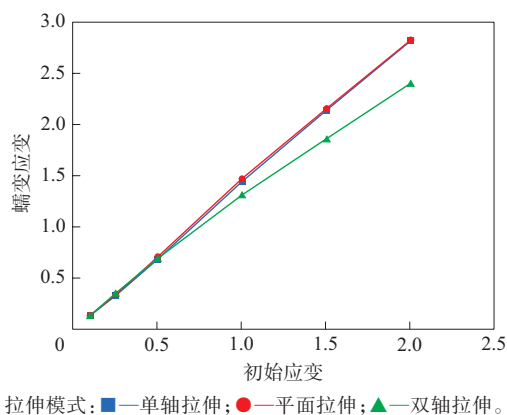


图8 不同初始应变下3种拉伸模式的蠕变对比
Fig.8 Creep comparison of three tensile modes under different initial strains

C3D8H和C3D8R单元模拟橡胶变形和隔板,计算垂向预压缩载荷为150 kN的变形行为,然后借助Visco模块模拟沙漏弹簧经历压缩10 000 min后的蠕变量。沙漏弹簧蠕变仿真与试验如图9所示,沙漏弹簧经过10 000 min后的蠕变量如图10所示。

从图10可以看出,扣除静态预压缩产生的位移量,仿真获得的纯蠕变量为6.2 mm,试验得

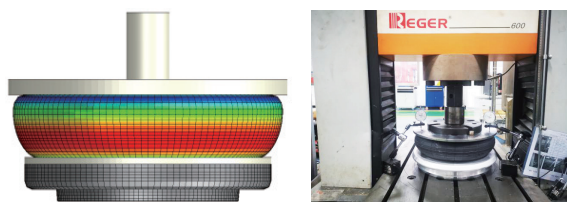


图9 沙漏弹簧蠕变仿真与试验
Fig.9 Creep simulation and testing of hourglass spring

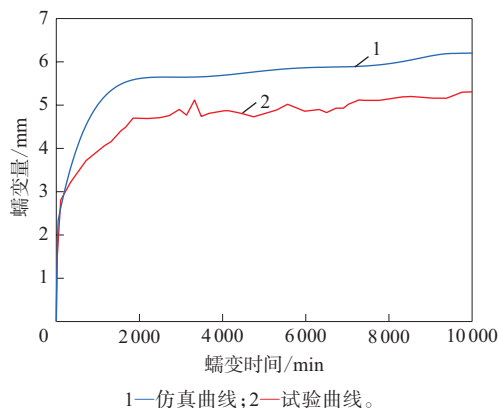


图10 沙漏弹簧蠕变仿真与试验曲线
Fig.10 Creep simulation and testing curves of hourglass spring

到的蠕变量为5.3 mm,仿真与试验的蠕变量误差为17.0%,表明该蠕变仿真预测方法对于预测沙漏弹簧的蠕变是可行的,在工程上是可接受的。

5 结论

本工作应用Prony级数模型对隔振橡胶材料的应力松弛数据进行拟合,并将拟合参数应用于隔振橡胶材料简单应变模式下的蠕变特性研究,得到结论如下。

(1) 隔振橡胶材料的应力松弛数据归一化分析表明,隔振橡胶材料的粘弹行为是非线性的,但在一些应变区域内,可将其粘弹特性近似认为线性。

(2) 在Ogden超弹本构方程中引入Prony级数因子,得到描述隔振橡胶材料基于弹性与粘性的复合的粘超弹本构方程。

(3) 隔震橡胶材料单轴拉伸和平面拉伸模式的蠕变应变几乎相同,可用单轴拉伸模式的蠕变或松弛数据替代平面拉伸模式的剪切蠕变或松弛数据。

(4) 隔震橡胶材料双轴拉伸模式的蠕变应变相对较小,表明其采用双轴拉伸模式有更好的抗蠕变效果,可为减振产品设计提供理论支撑。

(5) 沙漏弹簧蠕变量的有限元仿真与试验结果基本吻合,表明预测沙漏弹簧的蠕变方法是可行的,在工程上是可接受的。

参考文献:

- [1] 黄友剑. 减振橡胶疲劳寿命预测方法与工程应用[D]. 湘潭:湘潭大学,2020.
- [2] 周梦雨,李凡珠,杨海波,等. 基于非线性黏弹性本构模型的轮胎滚动和生热[J]. 高分子材料科学与工程,2020,36(3):73-78.
ZHOU M Y, LI F Z, YANG H B, et al. Tire rolling and heat generation based on nonlinear viscoelastic model of parallel rheological framework[J]. Polymer Materials Science & Engineering,2020,36(3):73-78.
- [3] 李东方,赵应龙,肖全山. 一种舰用橡胶减振器疲劳寿命预测方法研究[J]. 机电工程,2020,37(7):811-815.
LI D F, ZHAO Y L, XIAO Q S. Fatigue life prediction method for shipborne rubber shock absorber[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine,2020,37(7):811-815.
- [4] 李晓芳,张春亮. 橡胶材料疲劳断裂特性研究进展[J]. 计算机辅助工程,2010,19(3):64-69.

- LI X F, ZHANG C L. Research advance on rubber material fatigue and fracture characteristics[J]. Computer Aided Engineering, 2010, 19(3): 64–69.
- [5] 王强, 周强. 橡胶隔振器蠕变特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2001, 21(4): 19–21, 30.
- WANG Q, ZHOU Q. Study on the drift of rubber mount[J]. Noise and Vibration Control, 2001, 21(4): 19–21, 30.
- [6] 王利荣, 吕振华, ICHIRO H. 橡胶隔振器有限元建模技术及静态弹性特性分析[J]. 汽车工程, 2002, 24(6): 480–485.
- WANG L R, LYU Z H, ICHIRO H. Finite element modeling of rubber mount and its static elastic characteristic simulation[J]. Automotive Engineering, 2002, 24(6): 480–485.
- [7] LUO R K, ZHOU X L, TAN J F. Numerical prediction and experiment on rubber creep and stress relaxation using time-dependent hyper elastic approach[J]. Polymer Testing, 2016, 52: 246–253.
- [8] YANG L M, SHIM V P W. A visco-hyperelastic constitutive description of elastomeric foam[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(19): 1099–1110.
- [9] 周相荣, 王强, 王宝珍, 等. 一种基于Yeoh函数的非线性粘超弹本构模型及其在冲击仿真中的应用[J]. 振动与冲击, 2007, 26(5): 33–37.
- ZHOU X R, WANG Q, WANG B Z, et al. A nonlinear visco-hyperelastic constitutive model based on Yeoh strain energy function with its application to impact simulation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(5): 33–37.
- [10] BERNSTEIN B, KEARSLEY E A, ZAPAS L J. A study of stress relaxation with finite strain[J]. Journal of Rheology, 1963, 7(1): 391–410.
- [11] 于海富, 李凡珠, 杨海波, 等. 橡胶材料非线性高弹-粘弹性本构模型的研究[J]. 橡胶工业, 2017, 64(12): 719–723.
- YU H F, LI F Z, YANG H B, et al. Study on nonlinear hyper-viscoelastic constitutive model for rubber composite[J]. China Rubber Industry, 2017, 64(12): 719–723.
- [12] 于海富, 李凡珠, 杨海波, 等. 有限变形下橡胶材料非线性高弹-粘弹性本构模型[J]. 橡胶工业, 2017, 64(11): 645–649.
- YU H F, LI F Z, YANG H B, et al. A nonlinear hyper-viscoelastic constitutive model for rubber material with finite strain[J]. China Rubber Industry, 2017, 64(11): 645–649.
- [13] 杨挺青, 罗文波, 徐平. 黏弹性理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [14] 贺永红, 李继平, 易伟球, 等. 锥形弹簧橡胶/金属粘合不牢原因分析及解决措施[J]. 特种橡胶制品, 2016, 37(3): 56–58.
- HE Y H, LI J P, YI W Q, et al. Analysis and solving measures of adhesion failure between rubber and metal of conical spring[J]. Special Purpose Rubber Products, 2016, 37(3): 56–58.

收稿日期: 2022-04-27

Research on Creep Characteristic of Damping Rubber Material on Simple Strain Mode

RONG Jigang^{1,2}, HUANG Youjian², BU Jiling², YANG Jun^{1,2}

(1. Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China; 2. Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: The stress relaxation test data of damping rubber materials were normalized, and the corresponding viscoelastic constitutive parameters were obtained by fitting the stress relaxation test data with Prony series model. The Prony series factor representing the viscoelastic characteristics was introduced into the Ogden hyperelastic constitutive equation to obtain the constitutive equation of damping rubber material based on time effect, and then the creep characteristics of uniaxial tension, biaxial tension and plane tension modes were analyzed. Finally, the creep simulation and test verification using hourglass spring were carried out. This creep simulation prediction method could provide a new idea for viscoelastic experiment, creep calculation and engineering application of damping rubber materials.

Key words: damping rubber material; creep characteristics; viscoelastic characteristics; strain mode; hyperelastic constitutive equation; Prony series model; hourglass spring