

特种阻尼硅橡胶的黏-超弹性本构模型

祝亮¹ 陈薄¹ 贾清健² 古忠涛¹

(1 西南科技大学制造科学与工程学院制造过程测试技术教育部重点实验室, 绵阳 621010)

(2 西安空间无线电技术研究所, 西安 710100)

文 摘 ZN-37特种阻尼硅橡胶是一种能够消耗并储存振动能量的黏弹性阻尼材料,广泛应用于航空航天等领域的高精密减振结构中。在对基于ZN-37特种阻尼硅橡胶的减振结构进行分析与设计时,充分表征材料的黏弹性力学行为以及精确描述其本构关系显得尤为重要。依据Zener修正模型,将ZN-37特种阻尼硅橡胶的黏-超弹性本构模型分解为超弹性本构模型与黏弹性本构模型并联耦合的系统。通过标准试样的准静态拉伸试验与应力松弛试验,获得了本构模型中的材料参数,并采用不同加载速率下的准静态拉伸试验验证了本构模型的可靠性。所建立的黏-超弹性本构模型能够较好地反映ZN-37特种阻尼硅橡胶在低加载速率下的力学特性。

关键词 阻尼硅橡胶,黏-超弹性,本构模型,准静态拉伸

中图分类号:TB3

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.01.005

Visco-hyperelastic Constitutive Model of Special Damping Silicone Rubber

ZHU Liang¹ CHEN Bo¹ JIA Qingjian² GU Zhongtao¹

(1 Key Laboratory of Ministry of Education for Testing Technology for Manufacturing Process, School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010)

(2 Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100)

Abstract ZN-37 special damping silicone rubber is a viscous damping material capable of dissipating and storing vibrational energy, and is widely used in high-precision vibration damping structures in aerospace and other fields. When analyzing and designing vibration reduction structures based on ZN-37 special damping silicone rubber, it is particularly crucial to fully characterize the viscoelastic mechanical behavior of the material and accurately describe its constitutive relationship. Based on the Zener modified model, the visco-hyperelastic constitutive model of ZN-37 special damping silicone rubber is decomposed into a parallel coupling system of the hyperelastic constitutive model and the viscoelastic constitutive model. Material parameters for the constitutive model are obtained through quasi-static tensile tests and stress relaxation tests on standard specimens. The reliability of the constitutive model is verified using quasi-static tensile tests conducted at different loading rates. The established visco-hyperelastic constitutive model can effectively reflect the mechanical properties of ZN-37 special damping silicone rubber at low loading rates.

Key words Damping silicone rubber, Visco-hyperelasticity, Constitutive model, Quasi-static tensile

0 引言

阻尼硅橡胶材料凭借其耐高温、轻质及高阻尼等特性,在特殊环境下展现出卓越的减振性能^[1-2]。其减振机理在于材料结构振动时发生的复杂力学行为,能够有效储存并耗散振动能量,从而实现振动抑制。当前,航天领域已广泛采纳此类材料设计减振

结构与器件,以抑制航天器在轨运行中的微振动,并取得了显著的抑振成效。

在设计基于阻尼硅橡胶的减振结构时,需深入理解其材料力学特性,并构建精确的本构模型。作为黏弹性材料,阻尼硅橡胶的本构关系较为复杂,直接运用胡克定律和牛顿流体定律构建广义分数导数

收稿日期:2023-03-26

第一作者简介:祝亮,1996年出生,硕士研究生,主要从事机械系统动力学研究工作。E-mail:ZL_030921@163.com

通信作者:陈薄,1978年出生,副教授,主要从事现代机械设计理论与方法、机械系统动力学、润滑与密封技术等研究工作。E-mail:chenbo@mail.nwpu.edu.cn

本构模型,虽能较好地描述材料在外部激励下的动态力学特性及黏弹性阻尼特性^[3-5],但计算繁琐,工程应用受限。

针对特定材料,采用唯象学理论和积分遗传规律等基本原埋,分离材料的黏性与超弹性行为,利用应变能函数刻画超弹性特性,借助遗传积分算法描述黏弹性特性,重组构建黏-超弹性本构关系,已成为建立黏弹性材料本构模型的关键途径^[6-14]。例如, KHAJEHSAEID等^[6]采用“Exp-Ln”应变能函数描述超弹性行为,结合遗传积分算法描述黏弹性行为,构建了适用于大变形高阻尼橡胶材料的三维黏-超弹性本构模型,并通过标准试件的单轴拉伸试验验证了模型的可靠性。POURIAYEVALI等^[7-8]则针对高应变率下的聚氨酯橡胶和三元乙丙橡胶,采用多项式近似应变能函数,以应力与弛豫时间的积分描述黏弹性行为,建立了相应的黏-超弹性本构模型,并通过单轴拉伸和霍普金斯压杆试验验证了模型的正确性。

此外,于海富等^[12-13]对 Zener 修正本构模型进行了改进,将总应力分解为弹性应力和黏性应力,比较了采用黏性应力和应力松弛反作用力之和描述与采用 Boltzmann 叠加近似两种方法的适用性。周梦雨等^[14]则采用并行流变模型描述橡胶材料的非线性黏弹性力学行为,建立了黏-超弹性本构方程,并通过准静态力学试验拟合了超弹性和黏弹性材料参数。

本文针对 ZN-37 特种阻尼硅橡胶复杂的黏-超弹性力学行为,将 Zener 修正本构模型解耦为超弹性和黏弹性并联系统,通过标准试件的准静态拉伸与应力松弛试验确定模型参数,建立适用于 ZN-37 特种阻尼硅橡胶小应变率条件下的黏-超弹性本构模型,并通过变加载速率下的准静态拉伸试验验证模型的可靠性。

1 ZN-37 特种阻尼硅橡胶黏-超弹性本构模型

ZN-37 特种阻尼硅橡胶变形过程中,同时进行着能量储存和损耗,其本构关系可采用 Zener 修正模型表示,如图 1 所示。Zener 修正模型中将黏弹性材料的力学行为简化为由非线性弹簧 E_H 和 Maxwell 模

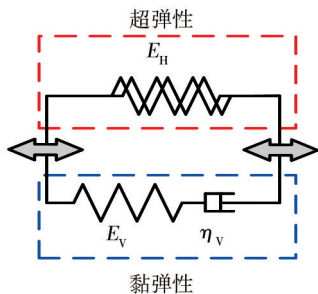


图 1 Zener 修正模型

Fig. 1 The modified model of Zener

型(非线性弹簧 E_V 和阻尼器 η_V 串联)组成的并联系统,采用非线性弹簧 E_H 近似材料的超弹性行为,采用非线性弹簧 E_V 和阻尼器 η_V 串联结构模拟材料的动态黏弹性行为^[11,12]。因此,ZN-37 特种阻尼硅橡胶的总应力可以表述为:

$$\sigma = \sigma_H + \sigma_V \quad (1)$$

式中, σ_H 和 σ_V 分别为材料的超弹性应力和黏弹性应力。

1.1 超弹性本构模型

基于唯象学理论,假设 ZN-37 特种阻尼硅橡胶是各向同性且等温弹性的不可压缩材料。因此,其超弹性行为可描述为^[6,15-16]:

$$\sigma_H = -P^H I + 2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + I_1 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) B - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} B^2 \quad (2)$$

式中, P^H 是由边界条件确定的超弹性静水压力, I 是应变不变量, W 是应变能函数, I_1, I_2 分别是左柯西-格林应变张量 B 的第一、第二不变量。

对于不可压缩超弹性材料,左柯西-格林应变张量 B 可由材料的单轴拉伸比计算,其计算公式为^[6,16]:

$$B = \begin{bmatrix} \lambda^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^{-1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, λ 为材料的拉伸比,其与真实应变 ε 的关系为 $\lambda = \varepsilon + 1$ 。

因此,左柯西-格林应变张量 B 与应变不变量 I 之间的关系如下^[6]:

$$\begin{cases} I_1 = \text{tr}(B) = \lambda^2 + 2\lambda^{-1} \\ I_2 = \frac{1}{2} [I_1^2 - \text{tr}(B^2)] = 2\lambda + \lambda^{-2} \\ I_3 = \det(B) = 1 \end{cases} \quad (4)$$

超弹性橡胶材料的弹性行为可由 Yeoh 提出的应变能函数 W 表征,采用 Rivlin 的幂级数逼近方法对应变能函数 W 进行简化,可以得到的应变能函数与应变不变量的关系为^[17]:

$$W = \sum_{i+j+k=1}^{\infty} C_{ijk} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j (I_3 - 1)^k \quad (5)$$

式中, C_{ijk} 为材料参数。

采用 Yeoh 三次项应变能函数表征 ZN-37 特种阻尼硅橡胶材料的超弹性行为,忽略第三不变量 I_3 对材料应变的影响,应变能计算公式(5)可以简化为:

$$W = \sum_{i=1}^3 C_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (6)$$

式(6)中材料参数 C_{i0} 可由单轴拉伸试验数据直接获得。在单轴拉伸情况下,只有拉伸方向的主应力 ($\sigma_H = \sigma_{11}^H$) 不为 0,其余方向上主应力均为零 ($\sigma_{22}^H = \sigma_{33}^H = 0$)。将式(3)代入式(2)可得:

$$\sigma_H = \sigma_{11}^H = -P^H I + 2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + I_1 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \lambda^2 \quad (7)$$

$$\sigma_{22}^H = \sigma_{33}^H = -P^H I + 2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + I_1 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \lambda^{-1} = 0 \quad (8)$$

由式(6)-(8),得到ZN-37特种阻尼硅橡胶超弹性部分的应力计算公式为:

$$\sigma_H = 2(\lambda^2 - \lambda^{-1}) \left[C_{10} + 2C_{20}(\lambda^2 + 2\lambda^{-1} - 3) + 3C_{30}(\lambda^2 + 2\lambda^{-1} - 3)^2 \right] \quad (9)$$

1.2 黏弹性本构模型

黏弹性材料黏弹性应力状态主要取决于应变速率的时间历程,黏弹性应力可由存储应变能函数获得。根据Zener修正本构模型,ZN-37特种阻尼硅橡胶的黏弹性本构关系可表达为^[7-8]:

$$\sigma_V = -P^V I + \Omega = \int_{-\infty}^t \frac{\partial(\sigma_V^{ins})}{\partial \tau} \cdot \sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{t-\tau}{t_i}\right) d\tau \quad (10)$$

式中, P^V 为黏弹性静水压力, Ω 为与材料结构无关的矩阵函数, σ_V^{ins} 为瞬时黏弹性应力, t 为拉伸时间, τ 为积分变量, t_i 为松弛时间常数, N 为松弛函数项数。

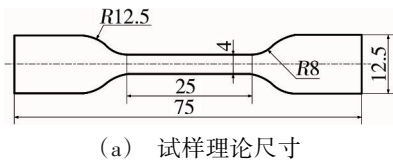
根据黏弹性材料的瞬时黏弹性行为,其瞬时黏

$$\sigma = \sigma_H + \sigma_V = 2(\lambda^2 - \lambda^{-1}) \left[C_{10} + 2C_{20}(\lambda^2 + 2\lambda^{-1} - 3) + 3C_{30}(\lambda^2 + 2\lambda^{-1} - 3)^2 \right] + \beta(\varepsilon) \int_{-\infty}^t \frac{\partial(\sigma_H)}{\partial \varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} \cdot \sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{t-\tau}{t_i}\right) d\tau \quad (14)$$

2 试验

2.1 材料及其制备

采用的ZN-37特种阻尼硅橡胶由航天材料及工艺研究所研制,其主要成分为甲基乙烯基硅橡胶^[18],厚度为2.0 mm。采用GB/T 528—2009制备材料试样,试样的尺寸如图2(a)所示,由标准的2型裁刀切取制成,试样如图2(b)所示。



(a) 试样理论尺寸



(b) 试样图片

图2 ZN-37试样尺寸

Fig. 2 The dimensions of ZN-37 samples

裁制的标准试样在常温常压环境下静置24 h(国标要求不少于8.0 h)以消除剪切残余应力。

2.2 试验方法

采用CMT4104-BZ型万能试验机和GB/T528—

弹性应力表示为^[7]:

$$\sigma_V^{ins} = \beta(\varepsilon) \cdot \sigma_H \quad (11)$$

式中, $\beta(\varepsilon)$ 为超弹性刚度与黏弹性刚度的比值。文献[12]的研究表明, $\beta(\varepsilon)$ 可以采用材料拉伸试验中加载与卸载阶段应变 ε 的多项式函数描述,结合拉伸试验结果,得到 $\beta(\varepsilon)$ 的计算公式为:

$$\beta(\varepsilon) = a_{11} \cdot \exp(a_{12} \cdot \varepsilon) + a_{21} \cdot \varepsilon^5 + a_{22} \cdot \varepsilon^4 + a_{23} \cdot \varepsilon^3 + a_{24} \cdot \varepsilon^2 + a_{25} \cdot \varepsilon + a_{26} \quad (12)$$

式中, ε 为材料的拉伸应变; a_{11} 、 a_{12} 、 a_{21} 、 a_{22} 、 a_{23} 、 a_{24} 、 a_{25} 、 a_{26} 均为材料黏弹性参数。

由式(10)-式(12),得到ZN-37特种阻尼硅橡胶材料黏弹性部分的应力计算公式为:

$$\sigma_V = \beta(\varepsilon) \int_{-\infty}^t \frac{\partial(\sigma_H)}{\partial \varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} \cdot \sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{t-\tau}{t_i}\right) d\tau \quad (13)$$

1.3 黏-超弹性本构模型

综合超弹性本构模型和黏弹性本构模型,即由式(1)、(9)和(13),得到ZN-37特种阻尼硅橡胶材料黏-超弹性应力计算公式为:

2009试验方法开展ZN-37特种阻尼硅橡胶材料的Mullins效应试验、单轴拉伸试验以及应力松弛试验,如图3所示。

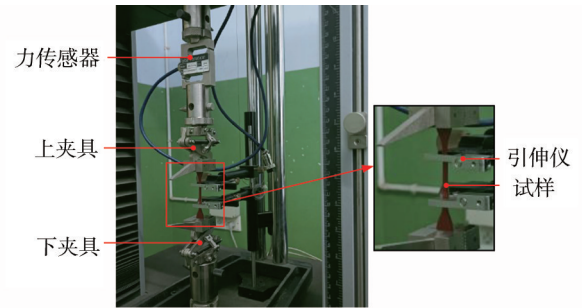


图3 ZN-37特种阻尼硅橡胶材料的试验装置

Fig. 3 Test equipment for ZN-37 special damping silicone rubber material

试验前先对试样测试段的实际宽度和厚度进行测量,并标记标距(标距 $L_0=20$ mm),然后将标记试样对称地装夹至万能试验机上下夹具,同时将大变形引伸计夹头紧定于标距位置。测试时力传感器记录拉伸力 F ,引伸计记录试样变形位移 L ,工程应力和工程应变的试验结果由 $\sigma=F/A$ 和 $\varepsilon=L/L_0$ 两个表达式计算得到,其中 A 为原始试样测试段平均横截面积。

试验在常温常压下进行, Mullins 效应试验的加载速率 $V=450$ mm/min, 试样拉伸至工程应变为 $\varepsilon=1.0$ 时循环加载 10 次, 得到稳定的应力应变关系测试数据。采用 Mullins 效应试验后的试样进行单轴拉伸试验或应力松弛试验。单轴拉伸试验的加载速率 V 分别为 50、150、300、450 mm/min, 试样的拉伸工程应变保持 $\varepsilon=1.0$ 。应力松弛试验的加载速率 $V=450$ mm/min, 加载至设定工程应变后停止加载, 测量其后 60 min 内试样的工程应力数据。应力松弛试验在工程应变 $\varepsilon=0.3、0.5、0.7、1.0$ 四种条件下进行。

3 试验结果与模型参数确定

3.1 试验结果

图 4 给出了 ZN-37 特种阻尼硅橡胶的 Mullins 效应试验结果。从图中可以看出, 材料在经历循环载荷(加载和卸载)的过程产生了滞留环, 滞留环随着循环加载次数的增加逐渐减小并趋于稳定。图中同时还可以看出, 随着循环加载次数的增加, 工程应力是逐渐减小的, 循环加载 3 次后, 工程应力基本趋于稳定。稳定的滞留环和工程应力表明材料具有较好的能量损耗特性。

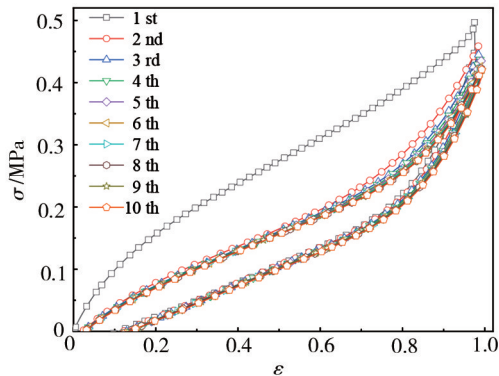


图 4 Mullins 效应试验结果

Fig. 4 The test results of Mullins effect

图 5 给出了单轴拉伸试验获得的不同加载速率下材料工程应力应变曲线。图中可以看出, ZN-37

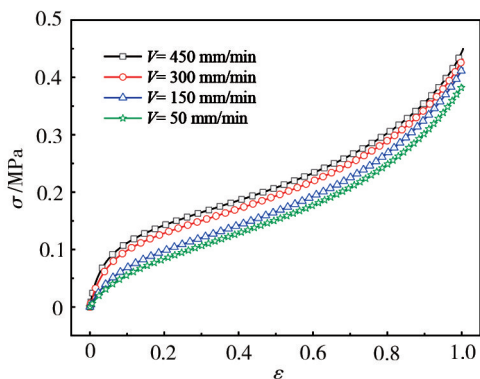


图 5 不同加载速率下材料的工程应力应变曲线

Fig. 5 The engineering stress-strain curves of materials under different loading rates

特种阻尼硅橡胶的工程应力随着加载速率的增加而增大。应力与应变的关系也较为复杂, 同一加载速率下, 工程应力随着材料工程应变的增加呈非线性增大, 即弹性模量是增大的。工程应力与应变和加载速率的关系表明, 材料的弹性模量并不是一个恒定值, 而是随着应变和加载速率变化的, 材料呈现出典型的非线性弹性特性, 具有应变率硬化的特征。

图 6 给出了应力松弛试验获得的不同应变条件下工程应力随拉伸时间的演化曲线。从图中可以看出, ZN-37 特种阻尼硅橡胶工程应力随着拉伸应变的增加而增大。拉伸状态下, 初始拉伸阶段, 工程应力随着拉伸时间迅速减小, 其后进入缓慢变化阶段, 直至趋于稳定值。工程应力随着拉伸时间的演化表明, 材料在加载初始阶段具有较强的应力松弛能力, 即能量损耗能力。

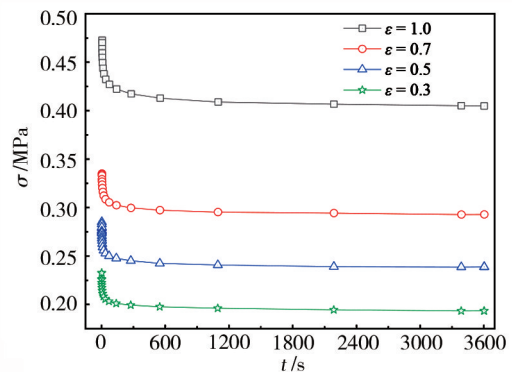


图 6 不同应变条件下材料的工程应力松弛曲线

Fig. 6 The engineering stress relaxation curves of materials under different strain conditions

3.2 黏-超弹性本构模型中的参数拟合

黏弹性本构模型中的松弛时间常数 t_i , 是与材料的应力松弛特性有关的。材料的应力松弛主要存在于卸载过程, 但加载过程中也是存在微小应力松弛的。为了获得可靠的松弛时间常数 t_i , 根据应力松弛反作用力(工程松弛应力与最大拉伸工程应力之差)与松弛时间的关系[式(15)]^[12], 采用工程应变 $\varepsilon=1.0$ 的应力松弛反作用力试验数据对其进行非线性最小二乘法拟合, 获得相应的材料参数和松弛时间常数 t_i 。

$$g(t) = K - K \sum_{i=1}^3 \left\{ k_i \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{t_i}\right) \right] \right\} \quad (15)$$

式中, K 和 k_i 均为无量纲材料参数, t 为松弛时间。

图 7 为试验结果和拟合结果的对比, 两者的相对误差为 6.67%, 表 1 给出了拟合得到的松弛时间常数 t_i 和材料参数。

对于本构模型中的其余材料参数, 根据加载速率 V 为 450 mm/min 的准静态单轴拉伸试验获得的应

力、应变和时间数据,结合ZN-37特种阻尼硅橡胶材料的本构方程(14),采用非线性最小二乘法进行参数拟合确定。图8所示为工程应力应变的试验结果和拟合结果的对比,表2给出了拟合得到的本构模型中的材料参数。

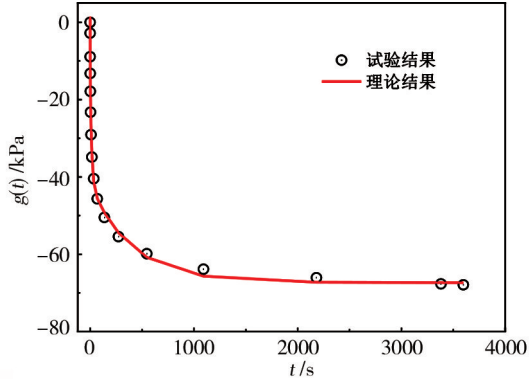


图7 工程应力松弛反作用力的试验结果与理论计算结果对比
Fig. 7 Comparison between experimental and theoretical calculation results of engineering stress relaxation reaction forces

表1 应力松弛反作用力的松弛时间常数与材料参数
Tab. 1 Relaxation time constant and material parameters of stress relaxation reaction stress

t/s			K/MPa	k_1	k_2	k_3
t_1	t_2	t_3				
403.400	1.385	15.120	2	17.500	11.370	17.430

表2 本构模型的材料参数

Tab. 2 Material parameters of the constitutive model

模型	材料参数	数值
超弹性本构模型	C_{10}	-5.590×10^{-3}
	C_{20}	1.788×10^{-3}
	C_{30}	-2.100×10^{-5}
黏弹性本构模型	a_{11}	-115.500
	a_{12}	-35.190
	a_{21}	12.470
	a_{22}	-92.780
	a_{23}	175.940
	a_{24}	-148.820
	a_{25}	60.510
	a_{26}	-11.080

引入拟合优度验证本构模型的可靠性,拟合优度越接近1.0,模型的拟合效果就越好,拟合优度(R^2)的计算公式为^[19-20]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (p'_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2} \quad (16)$$

式中, p'_i 为工程应力拟合结果, p_i 为工程应力试验结果, \bar{p} 为工程应力试验结果 p_i 的平均值。

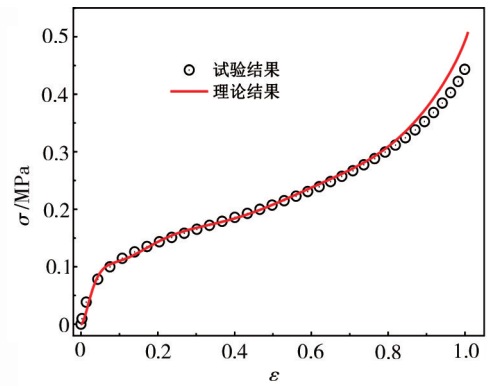


图8 工程应力应变的试验结果与理论结果对比
Fig. 8 Comparison between experimental and theoretical results of engineering stress-strain

根据拟合优度式(16),计算得到黏-超弹性本构模型对于加载速率 V 为450 mm/min的准静态单轴拉伸试验结果的拟合优度为0.980,已比较接近于1.0,表明本构模型对于此加载速率具有较好的拟合效果。

3.3 黏-超弹性本构模型参数验证

将拟合出的材料参数,代入式(14),得到ZN-37特种阻尼硅橡胶材料的黏-超弹性本构模型。为了验证该模型的可靠性,选择变加载速率下的准静态单轴拉伸试验结果对其进行验证。图9给出了加载速率 V 分别为480、300、150 mm/min三种条件下的准静态拉伸工程应力应变试验结果与本构模型理论计算结果的对比。

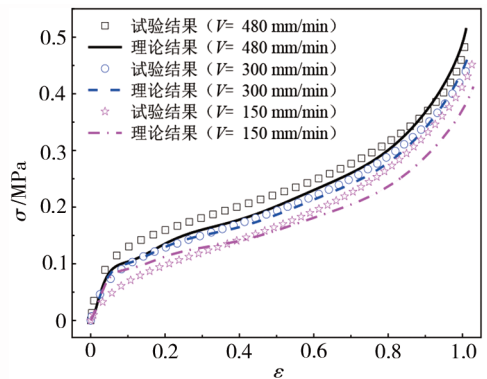


图9 不同加载速率下工程应力应变的试验结果与本构模型理论计算结果

Fig. 9 Experimental results and constitutive model theoretical results of engineering stress-strain under different loading rates

可以看出,本构模型计算结果与试验结果吻合较好。表3给出了图9试验条件下的拟合优度计算结果。三种试验条件下,拟合优度均大于0.95。因此,可以认为本文建立的ZN-37特种阻尼硅橡胶材料的黏-超弹性本构模型是可靠的。

图10给出了加载速率 V 为480、300、150 mm/min三种条件下的准静态拉伸工程应力应变试验结果与文献[7-8]中提出的黏-超弹性本构模型理论计算结

表3 不同加载速率下的拟合优度

Tab. 3 Fit goodness at different loading rates

$V/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	拟合优度(R^2)	$V/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	拟合优度(R^2)
480	0.974	300	0.952
150	0.952		

果对比。文献[7]中材料的超弹性采用 Mooney-Rivlin 模型(MR)描述,而文献[8]中采用的是 $N=2$ 多项式模型(PL, $N=2$)。可以看出,本构模型的理论计算结果与试验结果的吻合性非常差,表明这些典型的本构模型不能较好地表征 ZN-37 特种阻尼硅橡胶材料的动态力学行为。

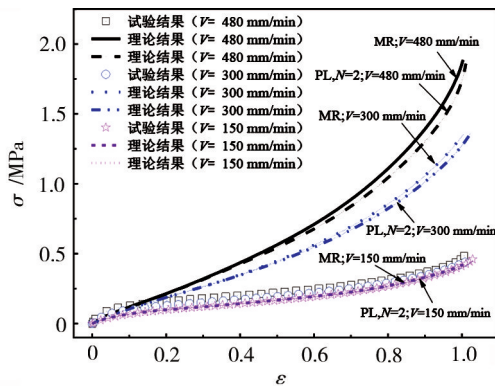


图10 工程应力应变的试验结果与文献[7-8]的本构模型理论计算结果对比

Fig. 10 Comparison between experimental results and the constitutive model of reference [7-8] theoretical results of engineering stress-strain

结合图9和图10可知,本文建立的黏-超弹性本构模型,较好地表征了 ZN-37 特种阻尼硅橡胶材料的动态力学性能,是一种可靠的本构模型。

4 结论

(1)经由 Mullins 效应试验、准静态单轴拉伸试验以及应力松弛试验,获取了 ZN-37 型特种阻尼硅橡胶材料的工程应力应变特性。在 Mullins 效应试验中,材料展现出了稳定的滞留环,这充分证明了其优良的能量损耗特性,其工程应力应变呈现出高度非线性特征,并且与加载速率密切相关。具体来说,应力值会随着加载速率和应变率的提升而增大。

(2)相较于 Mooney-Rivlin 模型和 $N=2$ 多项式模型, Yeoh 模型在描述 ZN-37 特种阻尼硅橡胶材料的超弹性特性上表现更佳。以此为基础构建的黏-超弹性本构模型,能够更加准确地表征 ZN-37 特种阻尼硅橡胶材料的黏-超弹性力学行为。

(3)采用 Zener 修正模型所构建的 ZN-37 型特种阻尼硅橡胶材料的黏-超弹性本构模型,在低加载速率下的准静态拉伸试验中的拟合结果与实际情况高度一致。该本构模型能够有效地表征 ZN-37 型特种

阻尼硅橡胶在低加载速率下的黏-超弹性力学性能。

参考文献

- [1] 李凡珠,刘金朋,卢咏来,等. 填充橡胶材料循环加载的本构行为及数值拟合[J]. 橡胶工业,2017,64(2):79-83.
- [2] LI F Z, LIU J P, LU Y L, et al. Modeling on constitutive behaviors of filled rubber compounds for cyclic loading path[J]. China Rubber Industry, 2017, 64(2): 79-83.
- [3] 赵云峰. ZN 系列粘弹性阻尼材料的性能及应用[J]. 宇航材料工艺,2001,31(2): 19-23.
- [4] ZHAO Y F. Properties and applications of ZN series viscoelastic damping materials [J]. Aerospace Materials & Technology, 2001, 31(2): 19-23.
- [5] BAGLEY R L, TORVIK P J. A Theoretical Basis for the Application of Fractional Calculus to Viscoelasticity Equations[M]. New York: John Wiley and Sons. Inc., 1993.
- [6] CUNHA-FILHO A G, BRIEND Y, LIMA A, et al. A new and efficient constitutive model based on fractional time derivatives for transient analyses of viscoelastic systems [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 146: 107042.
- [7] AMADORI S, CATANIA G. Experimental identification of the constitutive model of viscoelastic non-standard materials [C]//ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers, Arizona, 2016: V013T01A024.
- [8] KHAJEHSAEID H, ARGHAVANI J, NAGHDABADI R, et al. A visco-hyperelastic constitutive model for rubber-like materials: A rate-dependent relaxation time scheme [J]. International Journal of Engineering Science, 2014, 79(6): 44-58.
- [9] POURIAYEVALI H, GUO Y B, SHIM V P W. A constitutive description of elastomer behaviour at high strain rates -A strain-dependent relaxation time approach [J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 47: 71-78.
- [10] POURIAYEVALI H, GUO Y B, SHIM V P W. A visco-hyperelastic constitutive description of elastomer behaviour at high strain rates [J]. Procedia Engineering, 2011, 10: 2274-2279.
- [11] YANG L M, SHIM V P W, LIM C T. A visco-hyperelastic approach to modelling the constitutive behaviour of rubber [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(6/7): 545-560.
- [12] 黄锐宇,于培师,刘禹,等. 聚硅氧烷硅胶的黏超弹性力学行为研究[J]. 力学学报,2021,53(1):184-193.
- [13] HUANG R Y, YU P S, LIU Y, et al. Study on the visco-hyperelastic behavior of polysiloxane rubber [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(1): 184-193.
- [14] GAMONPILAS C, MCCUISTON R. A non-linear viscoelastic material constitutive model for polyurea [J]. Polymer, 2012, 53(17): 3655-3658.
- [15] 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): 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025年 第1期

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.

[13] 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 with finite strain [J]. China Rubber Industry, 2017, 64(11): 645-649.

[14] 周梦雨, 李凡珠, 杨海波, 等. 橡胶材料的非线性黏弹性本构模型[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(3): 79-84.

ZHOU M Y, LI F Z, YANG H B, et al. A nonlinear viscoelastic constitutive equation based on parallel rheological framework for rubber materials [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2020, 36(3): 79-84.

[15] RIVLIN R S, SAUNDERS D W. Large Elastic Deformations of Isotropic Materials [M]. New York: Springer, 1997.

[16] FATT M S H, OUYANG X. Three-dimensional constitutive equations for styrene butadiene rubber at high strain

rates[J]. Mechanics of Materials, 2008, 40(1/2): 1-16.

[17] YEOH O H. Some forms of the strain energy function for rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1993, 66(5): 754-771.

[18] 张欢, 许文, 张新兰. 特种阻尼硅橡胶长时热空气老化与贮存寿命[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(6): 73-78.

ZHANG H, XU W, ZHANG X L. Long-term aging and storage lifetime of specific damping silicone rubber in hot air environment [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2019, 35(6): 73-78.

[19] 管国阳, 孟政委, 谢立新, 等. 聚氨酯橡胶超弹性本构模型拟合效果评估[J]. 力学季刊, 2021, 42(3): 571-580.

GUAN G Y, MENG Z W, XIE L X, et al. Evaluation of fitting effectiveness of polyurethane rubber hyperelastic constitutive model[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2021, 42(3): 571-580.

[20] 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, 48.

HU X L, LIU X, LI M, et al. Selection strategies of hyperelastic constitutive models for carbon black filled rubber [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(5): 34-42, 48.