

硅橡胶拉伸行为的应变率相关性测试和表征

郭玲梅^{1,2}, 汪 洋³, 徐伟芳^{1,2}

- (1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999;
2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621999;
3. 中国科学技术大学工程科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘要: 为了研究硅橡胶在不同应变率下的冲击拉伸响应, 对硅橡胶板材进行了应变率为 0.001 s^{-1} 的准静态单向拉伸测试、应变率为 15 s^{-1} 的中应变率单向拉伸测试以及应变率分别为 350 s^{-1} 和 1400 s^{-1} 的高应变率单向拉伸测试。实验结果表明, 硅橡胶的单向拉伸力学行为呈现出明显的非线性弹性和应变率相关性特征。在实验结果的基础上, 提出了一个可用于描述硅橡胶在不同应变率下拉伸力学响应的宏观唯象黏超弹性本构模型。该模型假设硅橡胶在拉伸加载下的力学响应是超弹性响应和黏弹性响应的组合, 其一维流变学形式可以简述为一个超弹性的弹簧和一个松弛时间率相关的 Maxwell 体的并联。模型拟合结果与实验结果的对比显示, 该模型能有效表征硅橡胶在大应变率范围内的非线性拉伸力学行为。

关键词: 硅橡胶; 拉伸行为; 应变率相关性; 本构表征; 黏超弹性本构模型

中图分类号: O345

文献标识码: A

硅橡胶是一种具有优异的高/低温稳定性以及较好机械性能的高分子聚合物, 常用于车辆和防护结构等工程领域, 在使用过程中极有可能受到冲击载荷的作用, 因此有必要开展硅橡胶动态力学行为的研究。目前硅橡胶材料的力学行为研究多集中在准静态加载^[1-3]下, 而针对其动态力学行为的研究也大多集中在压缩力学行为^[4-5]方面。胡时胜等^[4]研究了泡沫硅橡胶的冲击压缩力学性能, 选用半导体应变片代替传统的电阻应变片解决了透射波信号微弱、信噪比低的问题, 最终得到泡沫硅橡胶材料在不同应变率下的冲击压缩响应, 实验结果表明: 泡沫硅橡胶材料的冲击压缩性能具有强烈的应变率相关性。赵习金等^[5]对硅橡胶进行了冲击压缩力学性能实验, 发现硅橡胶的冲击压缩力学行为表现出明显的应变率相关性, 其模量和应力极值均随着应变率的升高而增大。Shergold 等^[6]在对硅橡胶进行压缩性能测试的同时, 还进行了准静态下的单向拉伸测试, 对比结果显示, 硅橡胶材料的力学行为存在明显的拉压不对称性。因此, 为了全面了解硅橡胶材料的力学行为, 有必要对其进行动态拉伸力学行为研究。

橡胶类材料的力学行为既包含非线性弹性和应变率相关性, 还包含 Mullins 效应、迟滞效应、温度相关性等, 其中非线性弹性是其最基本的力学行为特征。由于橡胶力学行为的复杂性, 通常将率无关的非线性弹性行为和率相关的弹性行为进行解耦并分别加以描述, 即分别采用超弹性本构模型和黏弹性本构模型来表征其非线性的弹性行为和率相关的弹性行为。超弹性本构从应变能密度函数出发, 常表达为主伸长比或者变形张量的不变量的函数^[7], 按理论基础的不同又可分为分子网络模型^[8-10]和唯

* 收稿日期: 2018-10-18; 修回日期: 2019-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(U1230103)

作者简介: 郭玲梅(1991—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事材料动态力学行为研究。

E-mail: guolm@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 汪 洋(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事材料动态力学行为研究。

E-mail: yangwang@ustc.edu.cn

象模型^[11-13]两类:前者基于分子统计力学,具有明确的物理含义;而后者是经验型公式,往往具有更简洁的形式。Maxwell 模型和 Kelvin 模型是最基本的黏弹性模型,在此基础上发展出的标准三元件模型得到了广泛的应用,王礼立等^[14]选取一个非线性弹簧和两个 Maxwell 体并联构建了 ZWT 模型,能同时准确描述材料在准静态和动态加载下的应力-应变响应。

本工作利用 Instron-E3000 材料试验机、液压伺服中应变率材料试验机以及旋转盘式间接杆杆型分离式霍普金森拉杆(Split Hopkinson Tensile Bar, SHTB)对硅橡胶分别实施低、中、高应变率下的拉伸力学行为研究,基于实验结果提出一个宏观唯象本构模型,以表征硅橡胶在大应变率范围内的拉伸力学行为。

1 低-中-高应变率单向拉伸实验

实验选用甲基乙烯基硅橡胶,其代号为 MVQ,是日本信越化工公司生产的 KE951 型号硅橡胶生胶经由 190 ℃ 高温硫化得到的厚度为 3 mm 的黑色板材。

硅橡胶在准静态加载下的单向拉伸测试在 Instron-E3000 材料试验机上进行。试样形状为等宽长条形,长度为 140 mm,除夹持段外为 70 mm,试样宽度为 14 mm。橡胶类材料不可采用夹式引伸仪测量实验过程中的变形信息,因而采用自动网格法^[15]这一非接触式光学测量方法进行位移测量。相较于全息干涉法、云纹法等其他非接触式光测方法,自动网格法对操作环境无特殊的防震要求,且只需要白光光源,光路简单易操作。该方法通过 CCD 实时记录实验过程中布置在试件表面的网格点阵的运动,通过数字图像相关技术自动识别和比较变形前后的点阵图像,最终获得不同时刻试件中的变形场信息。该方法主要包含 3 个步骤:试件表面网格点阵的制作、网格点阵的拍摄以及数字图像的后处理。

中应变率单向拉伸测试在液压伺服的中应变率材料试验机上进行,试样形状亦为等宽长条形,为了和试验机夹持端匹配,试样宽度设置为 12 mm,试样夹持段长度为 25 mm。

高应变率单向拉伸测试在旋转盘式间接杆杆型 SHTB 上进行,试样形状为平板哑铃型(如图 1 所示),试样由橡胶裁刀配合冲片机冲压制得。鉴于硅橡胶低模量、低波阻抗的特性,本课题组发展了针对橡胶类材料的高应变率拉伸测试技术^[16]。该技术利用前置金属短杆解决了实验过程中加载脉冲形状控制以及恒应变率加载的问题;采用半导体应变片(灵敏度系数约为 120)代替普通应变片(灵敏度系数约为 2),有效提升了透射信号的信噪比,同时结合铝透射杆,有效解决了透射波信号弱的问题。

硅橡胶材料“软”的特征导致其不能采用螺纹连接的方式,又由于其表面活性基团少、表面能小,难以找到快速有效的胶粘连接方式,故发展了一种机械连接方式(如图 2 所示),用于实现硅橡胶和实验杆的有效连接。为了确保在拉伸加载过程中试样不会从夹持段中滑出,需要将试件沿厚度方向由 3 mm 夹紧至 2 mm,这将在试件连接段(即夹持段)端部到试验段产生一个厚度从 2 mm 到 3 mm 的过渡段。该段内的变形情况是非均匀的,且处于复杂应力状态(称之为端部效应),因此实验过程中不能简单地按照两个夹持段端部(即入射杆右端和透射杆左端)之间的标距计算试件的工程应变,即实验中基于入射/透射杆端的相对位移获得的工程应力-工程应变曲线并非试件材料真实的本构响应。为此建立了应变修正关系对实测的应变

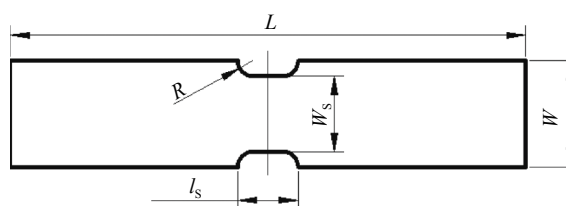


图 1 动态拉伸用试样

Fig. 1 Specimen for impact tensile test

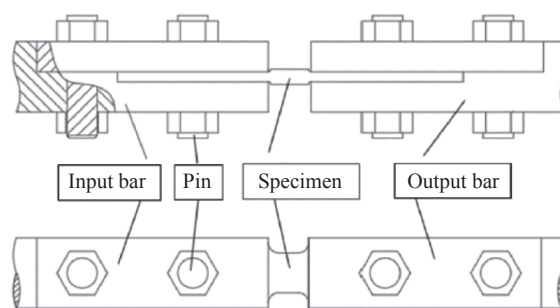


图 2 试样与入射/透射杆连接方式示意图

Fig. 2 Schematic of the connection between the sample and the input/output bar

信息进行修正。准静态测试时, 利用自动网格法测得的结果是材料的真实响应, 通过建立高应变率实验中采用短试件(长细比小)获得的应力-应变测试曲线与准静态实验中长试件(长细比大)的应力-应变测试结果之间的转换关系, 对高应变率实验结果进行标定。本研究中假设端部效应的影响与应变率无关, 利用 Instron E3000 材料试验机对准静态试样和高应变率试样(采用和高应变率实验时相同的连接方式)进行应变率为 0.001 s^{-1} 的单向拉伸测试, 其中准静态试样的应变信息由自动网格法测量, 而高应变率试样的应变信息由夹头位移计算得到。对比二者的实验结果, 得到高应变率试样的应变标定关系为 $\varepsilon_{\text{calibrated}} = 1.08\varepsilon_{\text{measured}}$, 即伸长比满足 $\lambda_{\text{calibrated}} - 1 = 1.08(\lambda_{\text{measured}} - 1)$ 。

通过实验探索和简单的数值模拟, 最终确定了动态试样的尺寸为: 试验段宽度 $W_s = 8 \text{ mm}$ 、长度 $l_s = 8 \text{ mm}$ 、倒角 $R = 2 \text{ mm}$, 试样夹持段和实验杆相匹配, 宽度为 14 mm , 试样总长度为 68 mm 。经验证, 该尺寸设计可以很好地满足 SHTB 的一维测试原理。试样中的平均工程应力、平均工程应变和平均工程应变率可根据入射/透射杆上的应变信息计算得到, 其计算公式如下

$$\sigma_s(t) = \frac{EA}{2A_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad (1)$$

$$\varepsilon_s(t) = \frac{C_0}{l_s} \int_0^t [\varepsilon_i(\tau) - \varepsilon_r(\tau) - \varepsilon_t(\tau)] d\tau \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{C_0}{l_s} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \quad (3)$$

式中: E 和 A 分别为入射/透射杆的弹性模量和横截面积, A_s 为试件的横截面积, C_0 为杆中的应力波波速, $\varepsilon_i(t)$ 和 $\varepsilon_r(t)$ 分别为入射波和反射波经过时入射杆上的应变历史, $\varepsilon_t(t)$ 为透射波经过时透射杆上的应变历史。

2 实验结果与讨论

基于前述的橡胶类材料高应变率拉伸测试技术, 对硅橡胶进行了应变率分别为 350 s^{-1} 和 1400 s^{-1} 的单向拉伸测试。图 3 所示为入射杆和透射杆上应变片实测得到的入射波、反射波以及透射波信号, 可以看到入射脉冲平稳光滑, 透射波信噪比满足测试精度要求。图 4 为应变率-时间曲线, 可见基本实现了恒应变率加载。图 5 给出了应变率为 350 s^{-1} 工况下的重复性曲线。硅橡胶的高应变率单向拉伸测试结果和金属材料相比表现出较差的重复性, 为此, 每个工况至少进行了 5 次有效实验, 并选取其中一条作为该工况下的代表性曲线。

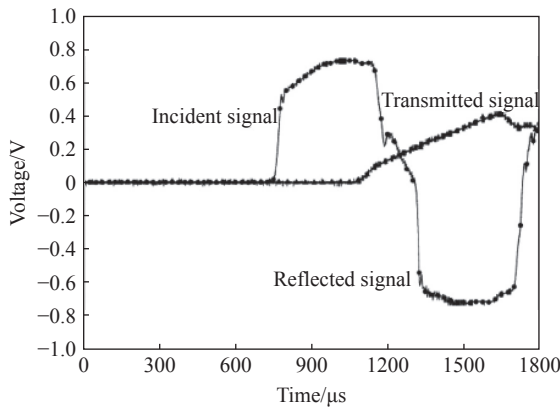


图 3 实测的入射、反射和透射波波形

Fig. 3 Measured incident, reflected, and transmitted wave waveforms

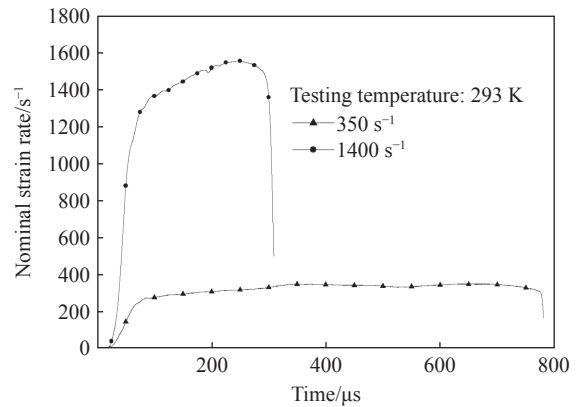


图 4 应变率-时间曲线

Fig. 4 Strain rate-time curve

硅橡胶在低-中-高应变率单向拉伸加载下的工程应力-伸长比曲线如图 6 所示。为了更直观地考察硅橡胶拉伸力学行为的应变率相关性, 图 7 中给出了给定应变下应力随应变率变化曲线。从图 6 中

可以看到: 曲线的切线模量随着应变的增大呈现下降的趋势, 试样卸载后的残余变形极小, 硅橡胶的拉伸力学响应呈现典型的非线性弹性; 随着应变率的升高, 模量和定伸长应力均上升, 表现出应变率硬化的特征。

运用自动网格法可以同时测量纵、横两个方向的变形信息这一优势, 考察了硅橡胶的泊松效应。对于理想不可压缩材料, 在各项同性假设前提下, 试样中的体积变化与主伸长比满足 $\Delta V/V_0 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 - 1 = \lambda_1 \lambda_2^2 - 1 = 0$, 可得 $\lambda_2 = 1/\sqrt{\lambda_1}$ 。利用自动网格法测得准静态下的横向-纵向伸长比结果, 并与理论结果对比(如图8所示), 结果显示硅橡胶在实验所测的变形范围内可近似为不可压缩材料。

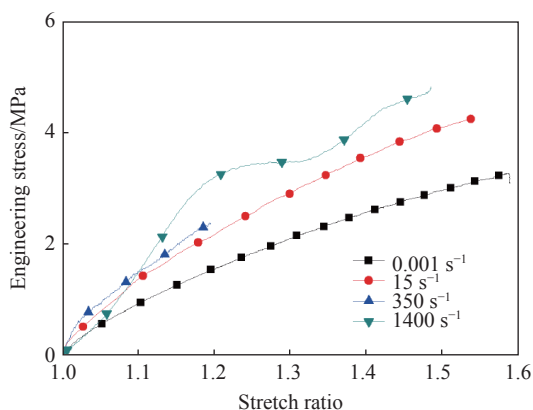


图6 不同应变率下硅橡胶工程应力-伸长比曲线

Fig. 6 Engineering stress-stretch ratio of silicone rubber at various strain rates

根据理论基础的不同, 超弹性本构模型可分为分子网络模型和唯象模型两大类。由于唯象模型相较于分子网络模型具有形式简单、参数少的优势, 因此采用唯象超弹性模型对硅橡胶非线性弹性响应进行表征。最具代表性的唯象本构模型是 Rivlin 提出的多项式模型^[12], 其应变能密度函数表达式为

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij}(I_1 - 3)^i(I_2 - 3)^j \quad (4)$$

式中: I_1 、 I_2 分别为应变张量的第一和第二不变量, C_{ij} 为材料参数。众多学者在此基础上分别取不同的低阶项得到了一系列简化模型, 如取 $N=1$, 则可得经典的 Mooney-Rivlin (MR) 模型。本研究最终采用修正 MR 模型对硅橡胶的非线性弹性行为进行表征, 该模型将 MR 模型中 I_2-3 的一次项变更为指数形式

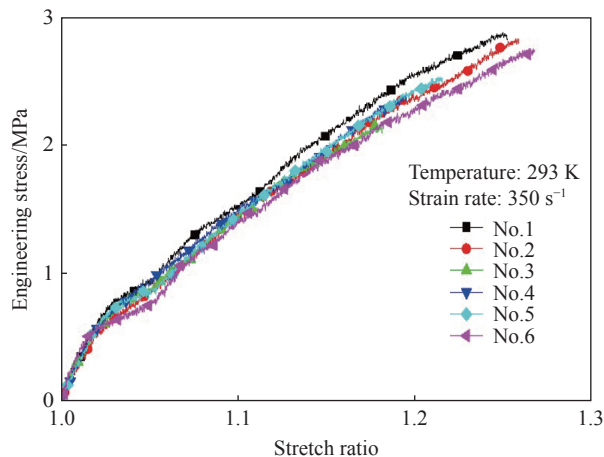


图5 350 s⁻¹ 应变率下的重复性曲线

Fig. 5 Repeatability curves at the strain rate of 350 s⁻¹

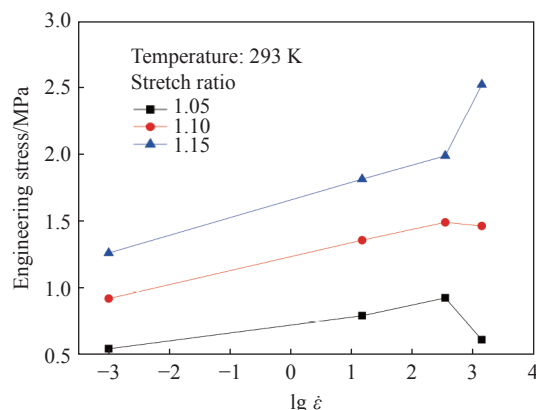


图7 定伸长应力随对数应变率变化关系

Fig. 7 Stress at a given stretch ratio varying with logarithm of strain rate

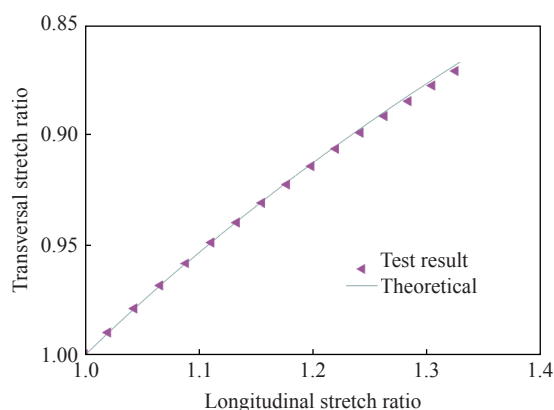


图8 可压缩性测试结果

Fig. 8 Test result of compressibility

$$W = C(I_1 - 3) + \frac{a}{b+1}(I_2 - 3)^{b+1} \quad (5)$$

式中: C 、 a 、 b 为模型参数。相应地, 不可压缩假设下单轴拉伸加载时工程应力(σ_n)-伸长比(λ)的表达式为

$$\sigma_n = 2\lambda \left(1 - \frac{1}{\lambda^3}\right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) = 2 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \left[C + \frac{a}{\lambda} (I_2 - 3)^b \right] \quad (6)$$

线性黏弹性模型由于形式简单而得到广泛的应用。以最常用的 Maxwell 模型为例, 其在恒应变率加载下的应力-应变关系可以表达为

$$\sigma_{\text{Maxwell}} = E_0 \dot{\epsilon} \theta \left(1 - e^{-\frac{\epsilon}{\dot{\epsilon} \theta}} \right) \quad (7)$$

式中: E_0 为 Maxwell 体中弹簧的模量; θ 为松弛时间, 表示 Maxwell 体在外力卸载以后恢复到原始状态所需要的时间。通过对 θ 作用机理的研究发现, 一个固定松弛时间的 Maxwell 体能够有效描述应变率跨度在两个数量级之内的黏弹性应力-应变响应, 在此跨度区间之外描述能力较差。经典的三元件模型(采用一个 Maxwell 体模型和一个弹簧并联的形式)运用广泛, 然而由于只采用了一个固定松弛时间的 Maxwell 体, 所以仅能描述材料在应变率跨度为两个数量级范围内的黏弹性力学响应。ZWT 模型^[14]将两个 Maxwell 体并联, 分别表征高聚物材料在准静态和高应变率下的黏弹性力学响应, 可以有效地描述材料在准静态和高应变率加载下的黏弹性力学响应。对于本研究所涉及的加载应变率范围 ($10^{-3} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$), 则必须引入 3 个 Maxwell 体, 这会导致模型形式过于复杂、模型参数过多, 给模型参数的准确确定带来困难。

采用一个率相关的 Maxwell 体模型描述硅橡胶拉伸力学行为的黏弹性特征, 其松弛时间表达为应变率的函数

$$\theta = \theta_0 (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)^{-\beta} \quad (8)$$

最终得到一个唯象黏超弹性模型, 其一维流变学形式如图 9 所示, 即一个超弹性的弹簧和一个松弛时间率相关的 Maxwell 体的并联, 分别对应硅橡胶单向拉伸力学行为的非线性弹性响应和黏弹性响应, 其中超弹性模型使用修正 MR 模型。超弹性模型和率相关 Maxwell 体以及黏超弹性模型的表达式分别为

$$\sigma_{\text{visco}} = E_0 \dot{\epsilon} \theta \left(1 - e^{-\frac{\epsilon}{\dot{\epsilon} \theta}} \right) \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{hyper}} = 2 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \left[C + \frac{a}{\lambda} (I_2 - 3)^b \right] \quad (10)$$

$$\sigma = \sigma_{\text{visco}} + \sigma_{\text{hyper}} \quad (11)$$

为方便计, 统一表达为伸长比 λ ($\lambda = 1 + \epsilon$) 的函数, 则有

$$\sigma = 2 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \left[C + \frac{a}{\lambda} \left(2\lambda + \frac{1}{\lambda^2} - 3 \right)^b \right] + E_0 \lambda \theta \left(1 - e^{-\frac{\lambda-1}{\lambda \theta}} \right) \quad (12)$$

为简单计, (8) 式中特征应变率 $\dot{\epsilon}_0$ 取为 0.001 s^{-1} , 采用非线性最小二乘法对硅橡胶在不同应变率下的工程应力-伸长比曲线进行拟合, 得到拟合结果与实验结果的对比如图 10

所示, 相应的模型参数值见表 1。由图 10 可见, 模型结果和实验结果具有较好的重合性, 对于 1400 s^{-1}

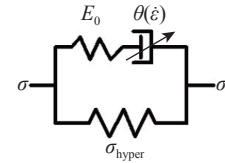


图 9 黏超弹性模型示意图

Fig. 9 Schematic of the visco-hyperelasticity constitutive model

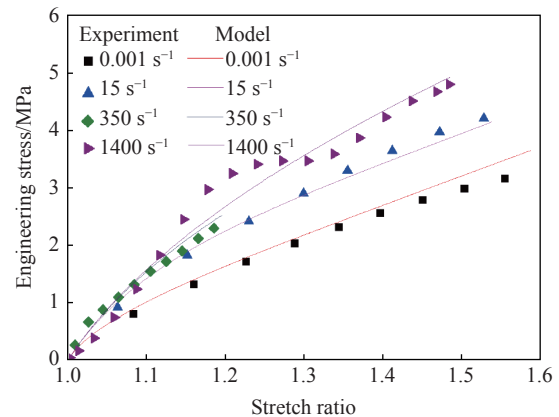


图 10 模型拟合结果与实验结果对比

Fig. 10 Comparison between model fitting and experimental results

应变率的实验结果,模型结果亦能很好地体现实验曲线的变化趋势,说明本研究提出的以率相关的 Maxwell 体并联修正 MR 模型得到的唯象黏超弹性模型能很好地描述硅橡胶材料在大应变率跨度内的黏超弹性变形特征。

表 1 模型参数值
Table 1 Parameter values

C/MPa	a/MPa	b	E_0/MPa	θ_0/s	β
2.862	-2.383	0.170	14.02	31.69	0.756

3 结 论

(1)通过改进的 SHTB 测试技术,可以准确地获得硅橡胶在高应变率加载下的拉伸力学响应,对比硅橡胶在低-中-高应变率下的单向拉伸测试结果可知:硅橡胶的拉伸力学行为具有显著的非线性特征和明显的应变率敏感性。

(2)将超弹性弹簧和松弛时间率相关的 Maxwell 体并联构建了一个唯象黏超弹性模型,二者分别对应于材料率无关的超弹性响应和率相关的黏弹性响应,模型拟合结果和实验结果的对比显示该唯象模型能很好地表征硅橡胶在大应变率范围内拉伸力学行为的非线性和应变率相关性特征。

参考文献:

[1] MEUNIER L, CHAGNON G, FAVIER D, et al. Mechanical experimental characterization and numerical modelling of an unfilled silicone rubber [J]. *Polymer Testing*, 2008, 27(6): 765–777.

[2] MACHADO G, CHAGNON G, FAVIER D. Induced anisotropy by the Mullins effect in filled silicone rubber [J]. *Mechanics of Materials*, 2012, 50: 70–80.

[3] BENEVIDES R O, NUNES L C S. Mechanical behavior of the alumina-filled silicone rubber under pure shear at finite strain [J]. *Mechanics of Materials*, 2015, 85: 57–65.

[4] 胡时胜, 王正道, 赵立中. 泡沫硅橡胶动态力学性能的实验研究 [J]. *高分子材料科学与工程*, 1999, 15(2): 113–115.
HU S S, WANG Z D, ZHAO L Z. Experimental study of dynamic mechanical behaviors of silicone rubber foam [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 1999, 15(2): 113–115.

[5] 赵习金, 卢芳云, 林玉亮. 硅橡胶的动态压缩实验和力学性能研究 [J]. *高压物理学报*, 2004, 18(4): 328–332.
ZHAO X J, LU F Y, LIN Y L. Research on dynamic compressive testing and mechanical properties of silicon rubber [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2004, 18(4): 328–332.

[6] SHERGOLD O A, FLECK N A, RADFORD D. The uniaxial stress versus strain response of pig skin and silicone rubber at low and high strain rates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(9): 1384–1402.

[7] TRELOAR L R G. The physics of rubber elasticity [M]. New York: Oxford University Press, 1975.

[8] KILIAN H G, UNSELD K. Rubber elasticity and network structure [J]. *Colloid and Polymer Science*, 1986, 264(1): 9–18.

[9] WU P D, GIESSEN E V D. On improved network models for rubber elasticity and their applications to orientation hardening in glassy polymers [J]. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, 1993, 41(3): 427–456.

[10] ARRUDA E M, BOYCE M C. A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1993, 41(2): 389–412.

[11] OGDEN R W. On constitutive relations for elastic and plastic materials [D]. Cambridge: University of Cambridge, 1970.

[12] RIVLIN R S. Large elastic deformations of isotropic materials IV: further developments of the general theory [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 1948, 241: 379–397.

[13] ANAND L. On H. Hencky’s approximate strain-energy function for moderate deformations [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1979, 46(1): 78–82.

[14] 黄德进, 孙紫建, 王礼立. 高聚物材料动态本构关系对 PP/PA 共混物的应用研究 [J]. *材料工程*, 2006(3): 3–5.
HUANG D J, SUN Z J, WANG L L. Study on PP/PA blended material by polymer dynamic constitutive relation [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2006(3): 3–5.

[15] 吕亚男, 郭玲梅, 邓志方, 等. 基于自动网格法的硅橡胶温度相关的拉伸力学行为 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2016, 32(2): 104–108.

- LÜ Y N, GUO L M, DENG Z F, et al. Temperature-dependent tensile behavior of silicon rubber using automated grid method [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2016, 32(2): 104–108.
- [16] 郭玲梅, 吕亚男, 邓志方, 等. 硅橡胶动态拉伸力学性能的实验研究 [J]. *北京理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 36(Suppl 1): 111–113, 130.
- GUO L M, LÜ Y N, DENG Z F, et al. Experimental study on dynamic tensile properties of silicone rubber [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2016, 36(Suppl 1): 111–113, 130.

Experimental Investigation and Modeling of Strain-Rate Dependence on Tensile Behavior of Silicone Rubbers

GUO Lingmei^{1,2}, WANG Yang³, XU Weifang^{1,2}

(1. *Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang 621999, China;*

2. *Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621999, China;*

3. *School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)*

Abstract: To investigate the impact tensile response of silicone rubber subjected to different strain rates, quasi-static uniaxial tension tests at the strain rate of 0.001 s^{-1} , moderate strain-rate tensile tests at the strain rate of 15 s^{-1} and high strain-rate tensile tests at the strain rates of 350 and 1400 s^{-1} were performed. Experimental results show that the tensile behavior of the filled silicone rubber exhibits apparent nonlinear elastic characteristic and strain-rate sensitivity. A phenomenological visco-hyperelastic constitutive model was proposed based on the obtained responses. The model is composed of a hyper-elastic spring and a Maxwell element with rate-dependent relaxation time, corresponding to hyper-elasticity and viscoelasticity respectively. The model results have good agreement with the experimental data, indicating that the model has the ability to describe the nonlinear and rate-dependent tension behavior of the filled silicone rubber.

Keywords: silicone rubber; tensile behavior; strain-rate dependence; constitutive modeling; visco-hyperelastic constitutive model