

丁腈橡胶大应变率范围本构模型建立

陈凯杰¹, 邱中辉^{2,3}, 陈蔚芳¹, 周晏锋¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 中国船舶集团公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078;
3. 船舶与海洋工程特种装备和动力系统国家工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要:为建立丁腈橡胶一类高分子聚合物在大范围应变率加载条件下的本构模型,采用超弹性-粘弹性模型描述丁腈橡胶的力学特性,通过低应变率拉压试验、中应变率动态扫频试验、高应变率霍普金森压杆冲击试验获取丁腈橡胶材料应力应变、储能模量和损耗模量数据。使用遗传算法对不同试验数据实际值与理论值误差的平方和函数进行优化,获得五阶 Prony 级数描述的粘弹性模型,分析了 Prony 级数阶数对拟合效果的影响规律。以某型船用减振器为对象,通过试验获取其静态刚度、动态刚度、阻尼比和冲击刚度,并在 ABAQUS 中进行相同工况的仿真验证,仿真刚度及阻尼比误差均小于 10%。结果表明:考虑不同应变率工况下的多种试验数据,采用遗传算法优化获得丁腈橡胶材料本构模型,能够在大范围应变率加载条件下描述橡胶的弹性及阻尼损耗特点。

关键词:丁腈橡胶;本构模型;冲击载荷;刚度阻尼特性

中图分类号:TH113 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.08.021

[引用本文格式]陈凯杰,邱中辉,陈蔚芳,等. 丁腈橡胶大应变率范围本构模型建立[J]. 热能动力工程,2024,39(8):183-192.
CHEN Kaijie, QIU Zhonghui, CHEN Weifang, et al. Establishment of constitutive model of nitrile butadiene rubber over a wide strain rate range[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(8): 183-192.

Establishment of Constitutive Model of Nitrile Butadiene Rubber Over a Wide Strain Rate Range

CHEN Kaijie¹, QIU Zhonghui^{2,3}, CHEN Weifang¹, ZHOU Yanfeng¹

(1. School of Mechatronics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China, Post Code: 210016;
2. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078; 3. National Engineering Research Center of Special Equipment and Power System for Ship and Marine Engineering, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: In order to establish the constitutive model of a class of polymer such as nitrile butadiene rubber under a wide range of strain rate loading condition, hyperelastic-viscoelastic model was used to accurately describe the mechanical properties of nitrile butadiene rubber. The stress-strain, energy storage modulus and loss modulus data of nitrile butadiene rubber were obtained by low strain rate compression test, medium strain rate dynamic frequency sweep test and high strain rate Hopkinson pressure bar test. The error weighted sum of squares of actual and theoretical values for different test data as fitness function were improved by genetic algorithm to obtain the viscoelastic model described by fifth-order Prony series and analyze the influence rule of the number of Prony series on fitting effect. Taking a marine shock absorber as object, its static stiffness, dynamic stiffness, damping ratio and impact stiffness were obtained through test, and the same working condition simulation experiment was conducted in ABAQUS, with simulated stiffness and damping ratio errors of less than 10%. The results show that considering various

experimental data under different strain rate conditions, the constitutive model of nitrile butadiene rubber material optimized by genetic algorithm can describe the elastic and damping loss characteristics of rubber under a wide range of strain rate loading condition.

Key words: nitrile butadiene rubber, constitutive model, impact load, stiffness and damping characteristics

引 言

燃气轮机是船舶动力系统的核心,在航行过程中需要确保燃气轮机装置在受到冲击后不产生损坏。橡胶材料具有超弹性、粘弹性性质,在外载荷卸载后可恢复原有形状,并且其力学特性还具有明显的应变率相关性^[1-2],可适用于不同的冲击环境,因此船舶燃气轮机装置通常采用橡胶减振器进行减噪抗振。

目前,对于橡胶材料复杂力学特性,通常将其解耦为应变率无关及应变率相关两部分,分别采用超弹性本构模型以及粘弹性本构模型加以描述^[3]。其中,王礼立^[4]提出的 Z-W-T 非线性粘弹性本构模型包含两个 Maxwell 单元和一个弹簧单元,力学模型较为简单,因此得到了广泛应用。但由于 Z-W-T 模型在不同应变率加载下具有不同的模型系数,雷经发等人^[5]在 Z-W-T 本构模型的基础上引入了一个与应变率、应变相关的超弹性修正系数,统一了不同应变率下本构模型的表达式。刘高冲等人^[6]通过将 Z-W-T 本构模型中的弹性单元替换为“三项式”超弹性本构模型,较好地描述了聚氨酯橡胶力学性能在不同试验中的非线性变化规律。杨建兴等人^[7]采用 Mooney-Rivlin 超弹性模型与广义 Maxwell 粘弹性模型建立了硅橡胶高应变率下的本构模型。林玉亮等人^[8]通过引入延迟函数,建立了应变率相关的 Ogden 模型。Gamonpilas 等人^[9]基于高阶 Rivlin 模型,建立了聚脲材料与应变历史、应变率相关的粘弹性本构模型。Song 等人^[10]提出一种基于 Mooney-Rivlin 超弹性模型,添加应变率相关项以建立三元乙丙橡胶准确静态以及动态压缩条件下的本构模型。Yang 等人^[11]通过粘弹性-超弹性本构方程描述不可压缩橡胶在高应变率下的大变形响应,

本构方程中 3 个系数描述超弹性行为、3 个系数描述粘弹性行为。现有研究中,Z-W-T 模型仅包含两个 Maxwell 单元,一组模型系数只适用于特定应变率工况,对其余应变率工况下的橡胶特性预测能力较差,且对橡胶阻尼比的描述不够准确。采用超弹性修正系数的方法,其本质是通过超弹性模型修正系数补偿粘弹性模型误差,虽然可以较好地预测不同应变率下的橡胶弹性,但由于粘弹性模型并不准确,不能准确体现阻尼耗散特性。

由于橡胶材料力学特性具有应变率相关性,在某一特定冲击工况下的橡胶应变率可能横跨多个数量级,故需要进一步提升本构模型在大应变率范围内的适应性,以提高不同应变率工况下的预测精度。本文通过低应变率拉压试验、中应变率动态扫频试验、高应变率霍普金森压杆冲击试验获取丁腈橡胶在大应变率范围内的应力和应变数据、储能模量和损耗模量数据;选取 Mooney-Rivlin (M-R) 模型作为超弹性本构模型;通过遗传算法对上述试验数据理论值与试验值的误差平方和函数进行优化,得到五阶 Prony 级数粘弹性模型,研究 Prony 级数的阶数对拟合效果的影响。以某型船用丁腈橡胶减振器为对象,基于前述超弹性-粘弹性模型建立减振器静态、动态、冲击仿真模型,并进行试验与仿真对比。

1 丁腈橡胶超弹性及粘弹性本构理论

1.1 超弹性本构模型

弹性势能函数通常用来描述材料在外力卸载后可恢复原状的超弹性特性,通过势能函数对不同的应变分量求导数得到不同的应力分量。丁腈橡胶的超弹性本构关系可由应变张量的 3 个不变量表示:

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \tag{1}$$

式中:W—势能函数; I_1, I_2, I_3 ——一阶、二阶、三阶的应

变不变量。

在单轴拉伸与压缩试验中,若假定加载方向上的主伸长率为 λ_1 ,由于橡胶材料近似不可压缩性,那么,3 个方向上的主伸长率有如下关系:

$$\lambda_1 = \lambda_2^{-2} = \lambda_3^{-2} \tag{2}$$

式中: λ_i —伸长率, $\lambda_i = 1 + \varepsilon (i = 1, 2, 3)$; ε_i —工程应变,压缩时取负。

柯西应力张量 σ 为:

$$\sigma = -pI + 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} B - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} B^{-1} \tag{3}$$

式中: p —静水压力,由材料的加载状态决定; I —变形不变量张量; B —左 Cauchy-Green 变形张量。

结合式(2)与式(3)即可得到在单轴拉伸与压缩状态下加载方向的真实应力 σ_T :

$$\sigma_T = 2 \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \tag{4}$$

1.2 粘弹性本构模型

广义 Maxwell 模型是将多个弹簧单元与粘性单元进行组合,每个由弹簧单元与粘性单元串联形成的 Maxwell 单元具有不同的模量以及粘度,使用 E_i 、 η_i 表示不同单元的弹性模量和粘性系数。在有限元软件中粘弹性材料通常使用 Prony 级数表示其力学特性与时间历程的相关性^[12]。若施加周期性激励则可以得到该激励频率下的材料储能模量 E' 以及损耗模量 E'' ^[13]。

$$E' = E \left[1 - \sum_{i=1}^n g_i \right] + E \sum_{i=1}^n \left(\frac{g_i \omega^2 \tau_i^2}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \right) \tag{5}$$

$$E'' = E \sum_{i=1}^n \left(\frac{g_i \omega \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \right) \tag{6}$$

式中: E —瞬时模量,MPa; g_i —第 i 个 Maxwell 单元无量纲化的模量; ω —激励角频率,rad/s; τ_i —第 i 个 Maxwell 单元的松弛时间; n —Maxwell 单元的个数; g_i, τ_i 可通过式(7)、式(8)与广义 Maxwell 模型中第 i 个模型的弹性模量 E_i 、粘性系数 η_i 相互转化。

$$E_i = g_i E \tag{7}$$

$$\eta_i = \tau_i E_i \tag{8}$$

g_i, τ_i 等本构系数在有限元软件中即称为 Prony 级数,而本构系数的组数也可以称为 Prony 级数的阶数。

2 丁腈橡胶本构模型系数确定

对于橡胶一类的近似不可压缩材料,单轴拉伸与等双轴压缩试验等效、单轴压缩与等双轴拉伸试验等效^[14]。单轴压缩和拉伸试验具有加载应变率可控性高、应力响应理论值计算便捷的特点,考虑到丁腈橡胶本构模型工程应用需求,采用单轴拉伸和压缩试验提供丁腈橡胶低应变率试验数据。

丁腈橡胶材料的力学性能应变率敏感性以及阻尼耗散作用主要体现在粘弹性本构模型中,每个 Maxwell 模型的松弛时间只对应一个有效的应变率范围^[15]。中应变率下的试验数据由动态扫频试验获取,高应变率下的试验数据由霍普金森压杆试验获取。

2.1 丁腈橡胶超弹性模型系数确定

丁腈橡胶超弹性系数可以通过电子试验机进行单轴压缩和拉伸试验,试验工装如图 1、图 2 所示。在单轴压缩试验中由于橡胶上、下表面与压盘之间存在难以避免的摩擦,使得橡胶并未处在单轴压缩状态而引入剪切作用^[16],因此压缩试验获得的应力值明显偏大。为减小应变状态对试验结果的影响,对压盘与橡胶接触表面进行润滑。单轴压缩试验参照 GB/T 7757-2009,在 20 ℃ 环境下采用圆柱丁腈橡胶试件进行试验,试件直径为 29.0 mm ± 0.5 mm,厚度为 12.5 mm ± 0.5 mm。分别进行加载速度为 1, 15 和 60 mm/min 的压缩试验,为后续粘弹性模型提供基础,对应的橡胶试件应变率分别为 0.001, 0.02 和 0.08 s⁻¹。单轴拉伸试验依据 GB/T 528-2009,采用 1 型哑铃型试件,厚度为 2 mm ± 0.2 mm。

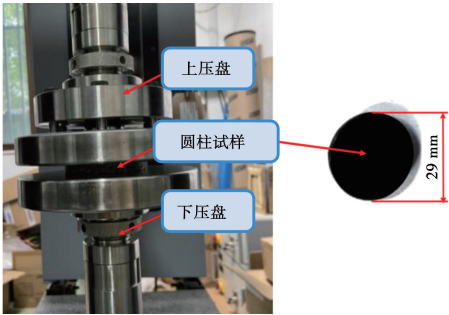


图 1 单轴压缩试验工装

Fig. 1 Uniaxial compression test kit

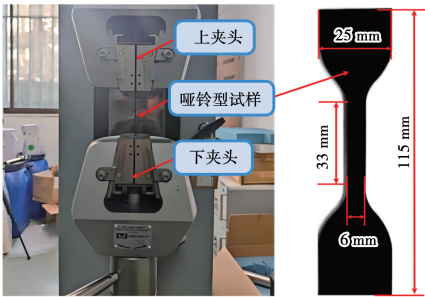


图 2 单轴拉伸试验工装
Fig. 2 Uniaxial tensile test kit

以应变率为 0.001 s^{-1} 的压缩与拉伸试验数据作为超弹性本构模型拟合数据源。由式(4)可得到不同模型的弹性势能函数表达式,最终得到单轴压缩试验中加载方向上的真实应力与伸长率的表达式。采用拟合效果较好且系数较少的 Mooney-Rivlin 模型,所得模型系数如表 1 所示^[17]。

表 1 Mooney-Rivlin 模型系数
Tab. 1 Coefficients of Mooney-Rivlin model

C_{10}/MPa	C_{01}/MPa
0.153 0	0.165 7

2.2 丁腈橡胶粘弹性模型系数确定

丁腈橡胶粘弹性模型系数通过动态热机械分析仪 (Dynamic Mechanical Analysis, DMA)、霍普金森压杆装置 (Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB) 获得,扫频试验工装如图 3 所示,冲击试验工装如图 4 所示。DMA 试验所使用的丁腈橡胶试件长度为 43 mm、宽度为 6 mm、厚度 2 mm,设定扫频范围 1 ~ 50 Hz,动态应变为 1%,得到丁腈橡胶在室温 20 ℃ 下的储能模量及损耗模量。该工况下,橡胶试件应变率大致范围为 $4 \sim 200\text{ s}^{-1}$ 。

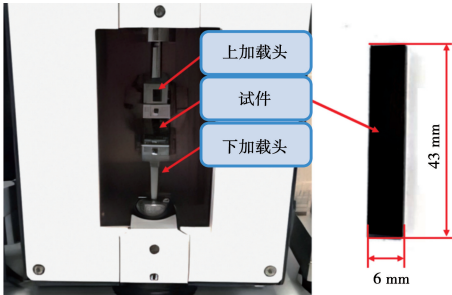


图 3 DMA 扫频试验工装
Fig. 3 DMA frequency sweep test kit

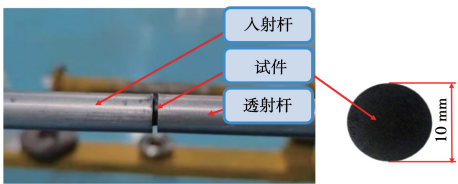


图 4 SHPB 冲击试验工装
Fig. 4 Split Hopkinson pressure bar test kit

SHPB 通过加速子弹撞击入射杆产生冲击信号,圆片试件夹持在入射杆与透射杆之间。应变信号由铝制入射杆、透射杆上的应变片采集获得,被测试件的应变与应力信息通过二波法间接计算得到。为了减少试件与入射杆、透射杆之间的摩擦,需采用润滑油对丁腈橡胶试件与入射杆、透射杆之间的接触面进行润滑。若 SHPB 试验中试样厚度超过 3 mm,则冲击过程难以达到力平衡状态,故使用直径为 10 mm,厚度为 2 mm 的丁腈橡胶试样^[7]。试验得到应变率峰值分别为 1 500, 2 000, 4 800 和 5 000 s^{-1} 工况下丁腈橡胶应力与应变曲线,以及如图 5 所示的应变率峰值为 2 000 s^{-1} 工况下的试样应变率曲线,中间部分可以认为应变率恒定^[18]。

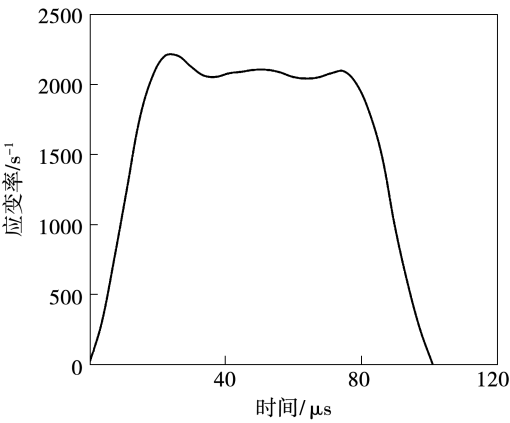


图 5 应变率峰值为 2 000 s^{-1} 工况下 SHPB 试验试样应变率曲线
Fig. 5 Strain rate curve of SHPB test specimen under 2 000 s^{-1} peak strain rate condition

SHPB 试验可以得到不同应变率下的橡胶材料的工程应力应变以及真实应力应变关系,其中,真实应力 σ_T 包含超弹性应力 σ_h 和粘弹性应力 σ_v 两部分:

$\sigma_T = \sigma_E \lambda = \sigma_h + \sigma_v$ (9)

式中: σ_E —试件工程应力,MPa; λ —加载方向上的伸长率。

粘弹性应力 σ_v 为:

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n \int_0^t E(t-T) \dot{\varepsilon}(T) dT$$
$$= \sum_{i=1}^n \int_0^t E_i \exp\left(-\frac{t-T}{\tau_i}\right) \dot{\varepsilon}(T) dT \quad (10)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ —应变率, s^{-1} 。

由于前述 SHPB 试验应变率恒定,故真实粘弹性应力可进一步简化为:

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n E_i \tau_i \dot{\varepsilon} \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\tau_i \dot{\varepsilon}}\right)\right] \quad (11)$$

得到丁腈橡胶在各加载应变率下的试验数据后,需要寻找一组 Prony 级数系数组合,使得 SHPB、DMA 试验的数据拟合效果同时达到最佳。由于需要拟合的 DMA 试验数据涉及频率与模量、SHPB 试验数据涉及应变与应力,变量涉及应力与应变、频率与模量,难以将其统一为一致的量纲,故选用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)对设定的目标函数 S 进行优化。目标函数设定为储能模量误差平方和、损耗模量误差平方和、SHPB 真实应力误差平方和的线性组合,其线性组合系数为每类试验数据的因变量最大值的倒数。由于 3 种试验之间数据的变量值、量级可能存在差异,对目标函数的影响不同,故需要通过这 3 个系数进行线性组合以归一化。目标函数 S 为:

$$S = a_1 S_1(\omega) + a_2 S_2(\omega) + a_3 S_3(\varepsilon) + a_4 S_4(\varepsilon) \quad (12)$$

$$S_1(\omega) = \sum_{j=1}^{N_1} \left[E(1 - \sum_{i=1}^n g_i) + E \sum_{i=1}^n \frac{g_i \omega_j^2 \tau_i^2}{1 + \omega_j^2 \tau_i^2} - E_s(\omega_j) \right]^2 \quad (13)$$

$$S_2(\omega) = \sum_{j=1}^{N_2} \left[E \sum_{i=1}^n \left(\frac{g_i \omega_j \tau_i}{1 + \omega_j^2 \tau_i^2} \right) - E_l(\omega_j) \right]^2 \quad (14)$$

$$S_3(\varepsilon) = S_4(\varepsilon) = \sum_{j=1}^{N_3} \left\{ 2 \left[(1 + \varepsilon_j)^2 - \frac{1}{1 + \varepsilon_j} \right] \cdot \left(C_{10} + \frac{1}{1 + \varepsilon_j} C_{01} \right) + \sum_{i=1}^n E_i \tau_i \dot{\varepsilon} \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon_j}{\tau_i \dot{\varepsilon}}\right) \right] - \sigma_\varepsilon(\varepsilon_j) \right\}^2 \quad (15)$$

式中: N_i ($i = 1, 2, 3$)—试验数据样本点数量; $E_s(\omega_j)$ —角频率为 ω_j 下的储能模量,MPa; $E_l(\omega_j)$ —

角频率为 ω_j 下的损耗模量,MPa; $\sigma_\varepsilon(\varepsilon_j)$ —在应变率为 $\dot{\varepsilon}$ 、真实应变为 ε_j 下的霍普金森压杆和单轴压缩试验的真实应力,MPa; a_1 —储能模量比例系数,取最大值的倒数; a_2 —损耗模量比例系数,取最大值的倒数; a_3, a_4 —SHPB、单轴压缩真实应力比例系数,取其试验值最大值的倒数。

Prony 级数的阶数越高,其模型包含的信息量越大。但对于阶数较高的模型,需要同时获取不同量级的松弛时间以描述不同应变率下的响应,防止 GA 算法优化得到的松弛时间较为密集,本文按照表 2 给出松弛时间 τ_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) 的取值范围设定 Prony 级数阶数为五阶。

表 2 GA 算法松弛时间取值范围

Tab. 2 Range of relaxation time in genetic algorithm

松弛时间	五阶	四阶	三阶	二阶
τ_1	$[10^{-7}, 10^{-5}]$	$[10^{-7}, 10^{-5}]$	$[10^{-7}, 10^{-3}]$	$[10^{-7}, 10^2]$
τ_2	$[10^{-6}, 10^{-4}]$	$[10^{-6}, 10^{-3}]$	$[10^{-4}, 10^{-1}]$	$[10^{-7}, 10^2]$
τ_3	$[10^{-5}, 10^{-1}]$	$[10^{-4}, 10^{-1}]$	$[10^{-3}, 10^2]$	—
τ_4	$[10^{-2}, 10^0]$	$[10^{-2}, 10^2]$	—	—
τ_5	$[10^0, 10^2]$	—	—	—

注:“—”表示无数据。

采用应变率 $2\,000\,s^{-1}$ 的 SHPB 真实应力—应变数据、 $0.02\,s^{-1}$ 单轴压缩真实应力—应变数据以及 $0 \sim 50\,Hz$ 频率范围内 DMA 频域储能、损耗模量数据优化得到的五阶 Prony 级数各阶系数,如表 3 所示。

表 3 Prony 级数系数

Tab. 3 Coefficients of Prony series

无量纲模量 g_i	松弛时间 τ_i
0.068 580	1.62×10^{-6}
0.894 377	3.00×10^{-5}
0.007 131	1.44×10^{-2}
0.005 087	8.62×10^{-2}
0.009 737	9.84×10^{-1}

3 Prony 级数拟合及预测效果分析

3.1 拟合及预测效果对比

为分析 Prony 级数阶数对其拟合及预测效果的影响,并验证前文获得五阶 Prony 级数对大应变率

范围的适应性,开展 Prony 级数拟合及预测效果分析。

依据上文所述方法,改变模型阶数、拟合数据来源,可以得到不同模型系数,其拟合结果如图 6 ~ 图 9 所示。将模型系数带入式(5)、式(6)和式(9),并转换为工程应力 - 应变,可得到不同模型在应变率为 0.08 和 5 000 s⁻¹时的工程应力 - 应变预测与试验对比如图 10、图 11 所示。

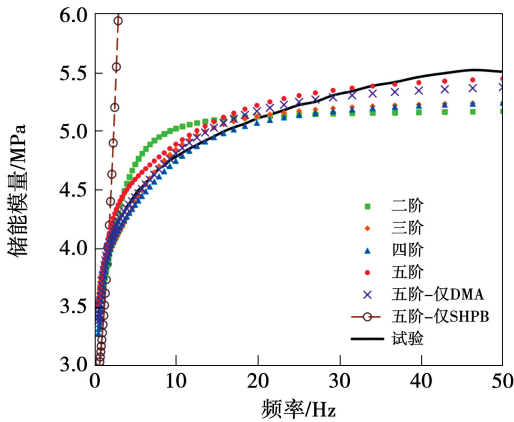


图 6 储能模量拟合结果

Fig. 6 Energy storage modulus fitting result

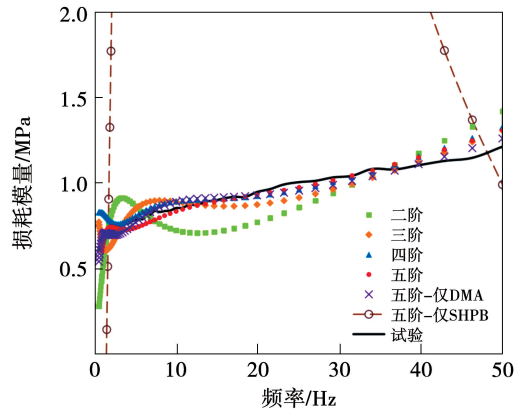


图 7 损耗模量拟合结果

Fig. 7 Loss modulus fitting result

二 ~ 五阶 Prony 级数均能较好地拟合及预测 SHPB 试验曲线。这是由于在高应变率下,松弛时间较大的 Maxwell 单元来不及松弛近似为线弹性,其无量纲模量与松弛时间较小的 Maxwell 单元相比也较小,故对高应变率冲击特性影响较小。因此,描述高应变率加载条件下的丁腈橡胶力学特性仅需要少量松弛时间较小的 Maxwell 单元。

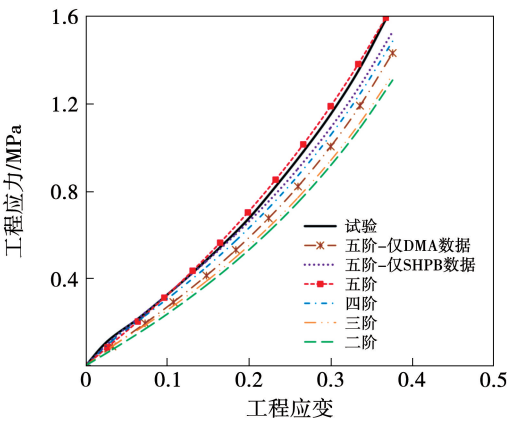


图 8 应变率 0.02 s⁻¹ 单轴压缩工程应力应变拟合结果
Fig. 8 Stress-strain fitting result of uniaxial compression test under 0.02 s⁻¹ strain rate condition

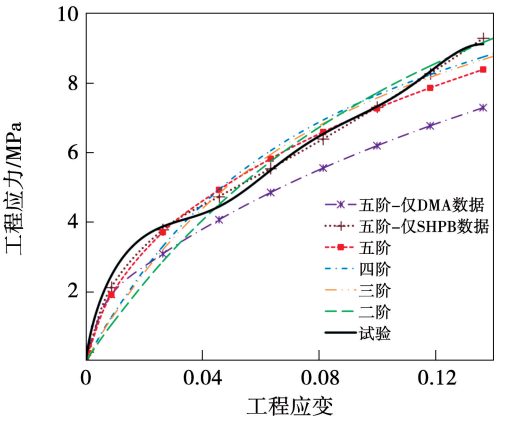


图 9 应变率 2 000 s⁻¹ SHPB 试验工程应力应变拟合结果
Fig. 9 Stress-strain fitting result of SHPB test under 2 000 s⁻¹ strain rate condition

储能模量、损耗模量、低应变率加载曲线拟合总误差随阶数上升而降低。这是由于在中低应变率加载条件下,松弛时间小的 Maxwell 单元完全松弛,不发生作用。故对于低阶 Prony 级数来说,除去上述 Maxwell 单元,用于描述中低应变率力学特性的单元数量较少,难以对储能模量、损耗模量进行准确拟合。

同样使用五阶 Prony 级数,仅考虑 DMA 数据进行系数优化,获得的模型只能较好地拟合储能模量及损耗模量,对 SHPB 高应变率、静态压缩数据预测效果较差。若仅考虑 SHPB 数据,获得的模型可以较好地预测静态压缩数据,对储能模量、损耗模量预测效果差。这说明同时准确描述橡胶大范围应变率

的刚度特性和阻尼耗散特性,需要不同应变率下的试验数据。

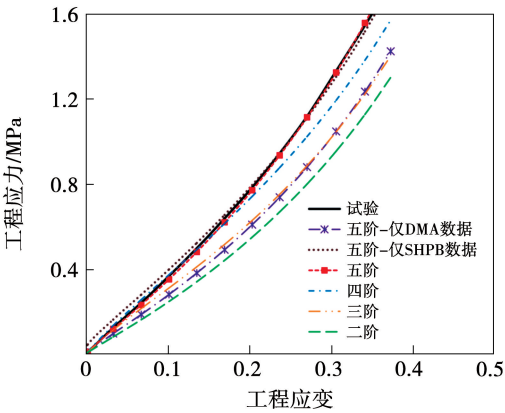


图 10 应变率 0.08 s^{-1} 单轴压缩工程应力应变预测结果

Fig. 10 Stress-strain predicted result of uniaxial compression test under 0.08 s^{-1} strain rate condition

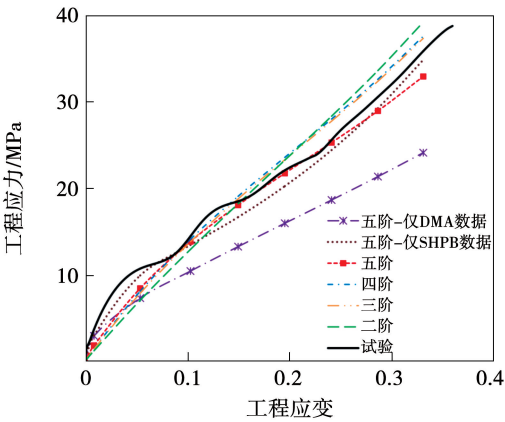


图 11 应变率 $5\,000\text{ s}^{-1}$ 弯应变率 SHPB 试验工程应力应变预测结果

Fig. 11 Stress-strain predicted result of SHPB test under $5\,000\text{ s}^{-1}$ strain rate condition

3.2 五阶 Prony 级数预测效果

不同阶数 Prony 级数的模型对应包含不同个数 Maxwell 单元的广义 Maxwell 模型,可以认为是实际橡胶力学特性的不同简化程度。阶数越高且松弛时间覆盖的作用域越广,则描述更精确。阶数的提升意味着系数拟合成本的加大。图 12 为获得的五阶 Prony 级数叠加 M - R 超弹性本构模型在低应变率条件下的工程应力预测效果,图 13 为高应变率条件下的工程应力预测效果。

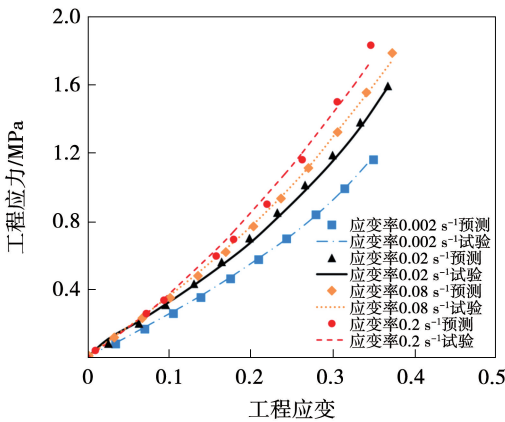


图 12 低应变率压缩试验与五阶 Prony 级数预测曲线对比

Fig. 12 Comparison of low strain rate compression test curve with fifth-order Prony series prediction

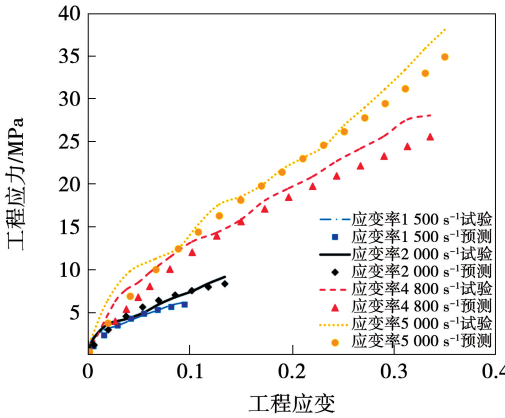


图 13 高应变率压缩试验与五阶 Prony 级数预测曲线对比

Fig. 13 Comparison of high strain rate compression test and fifth-order Prony series prediction curves

需要指出的是温度对丁腈橡胶本构模型有较大影响,本节中获得的丁腈橡胶本构模型适用于室温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。若温度从 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提升至 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,相同应变下的超弹性应力值将下降 $5\% \sim 8\%$,对于不同温度下的本构模型,可采用本节方法重新建立。

4 丁腈橡胶本构模型应用

为进一步验证丁腈橡胶本构模型的准确性,根据工程实际需要以及减振器应变率范围,基于 ABAQUS 对丁腈橡胶减振器进行静态、动态 ($7 \sim 15\text{ Hz}$) 以及落锤冲击 (冲击能量 $15.5 \sim 30.6$) 试验及有限元仿真分析。使用疲劳试验机完成静、动态试验,如图 14 所示。冲击试验在落锤冲击试验台上完成,如图 15 所示。

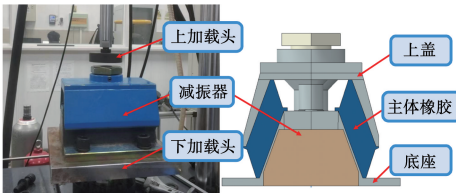


图 14 丁腈橡胶减振器静、动态试验工装
Fig. 14 Static and dynamic test kit for nitrile rubber shock absorber



图 15 丁腈橡胶减振器落锤试验工装
Fig. 15 Drop weight test kit for nitrile rubber shock absorber

试验及数据处理参考 CB 20189 - 2016, 由于该型减振器数据不公开, 对位移、加速度、力等参数进行无量纲化处理。无量纲化位移定义为真实位移与额定载荷下的减震器静位移的商, 无量纲化载荷定义为真实载荷与额定负载重力的商, 静态、动态冲击试验及仿真结果如图 16 ~ 图 18 所示, 仿真与试验无量纲化处理后的结果如表 4 所示。

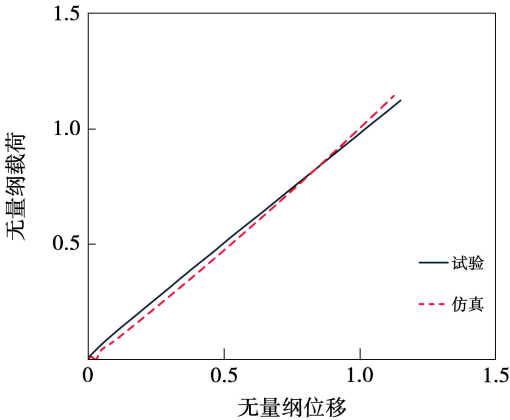


图 16 静态压缩试验位移 - 载荷试验与仿真曲线对比
Fig. 16 Comparison between displacement-load test curve and simulated curve under static compression test

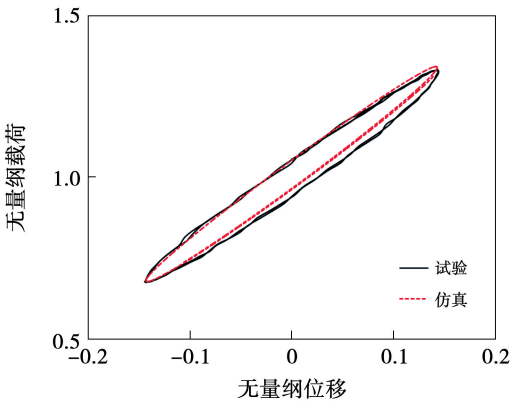


图 17 11 Hz 动态压缩试验位移 - 载荷试验与仿真曲线对比
Fig. 17 Comparison between displacement-load test curve and simulated curve under 11 Hz dynamic compression test

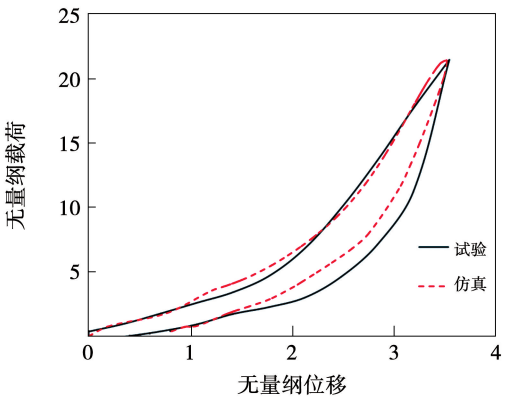


图 18 25.4 冲击能量试验位移 - 力试验与仿真曲线对比
Fig. 18 Comparison between displacement-load test curve and simulated curve under 25.4 impact energy test

表 4 丁腈橡胶减振器仿真与试验对比
Tab. 4 Comparison of simulation and test of nitrile rubber shock absorber

参 数	试验值	仿真值	误差/%
额定负载下静刚度	998.55	1 028.65	2.93
7 Hz 动态刚度	1 990.39	1 970.39	1.02
7 Hz 阻尼比	0.86	0.79	8.86
11 Hz 动态刚度	2 277.55	2 231.37	2.07
11 Hz 阻尼比	0.82	0.77	6.49
15 Hz 动态刚度	2 264.06	2 244.8	0.86
15 Hz 阻尼比	0.82	0.75	9.33
15.5 冲击能量 等效冲击刚度	3 338.21	3 105.72	7.49
25.4 冲击能量 等效冲击刚度	4 177.85	4 006.43	4.28
30.6 冲击能量 等效冲击刚度	4 487.14	4 180.00	7.35

由表 4 可知,本文建立的丁腈橡胶大应变率范围本构模型在低应变率工况(静态压缩试验)、中应变率工况(动态压缩试验)、高应变率工况(冲击试验)下均具有较好的精度,验证了该模型的可行性。

5 结 论

(1) 采用遗传算法对单轴压缩试验、动态扫频试验、SHPB 冲击试验数据的误差平方和进行寻优,同时限定松弛时间的取值范围,可以更准确地描述丁腈橡胶弹性及阻尼耗散特征,扩大丁腈橡胶本构模型的使用范围。

(2) 在拟合丁腈橡胶多种试验数据时,使用低于三阶的 Prony 级数会导致损耗模量出现较大波动;材料在高变率下的工程应力应变拟合效果随阶数的上升而降低;材料在低变率下的工程应力应变拟合效果随模型阶数的上升而提升。

(3) 建立的本构模型可以描述丁腈橡胶在 $0.002 \sim 0.2, 4 \sim 200$ 和 $1\,500 \sim 5\,000\text{ s}^{-1}$ 应变速率下的力学性能。静、动、冲击刚度及阻尼比仿真与试验误差均小于 10%。

参考文献:

[1] 段宇星,杨 强,赵苗苗,等. 弹性体材料应变率相关力学行为模型[J]. 橡胶工业,2020,67(12):899-903.
DUAN Yuxing, YANG Qiang, ZHAO Miaomiao, et al. Strain rate-related mechanical behavior model of elastomer materials[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(12): 899-903.

[2] CANDAU N, OGUZ O, PEUVREL-DISDIER E, et al. Effect of the strain rate on damage in filled EPDM during single and cyclic loadings[J]. Polymers, 2020, 12(12):3021.

[3] 魏家威,石膏鹏,冯振宇. 应变率相关的橡胶本构模型研究[J]. 高压物理学报,2022,36(2):105-115.
WEI Jiawei, SHI Xiaopeng, FENG Zhenyu. Strain rate dependent constitutive model of rubber[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(2): 105-115.

[4] 王礼立. 冲击载荷下高聚物动态本构关系对粘弹性波传播特性的影响[J]. 宁波大学学报(理工版), 1995, 8(3):30-57.
WANG Lili. The influence of dynamic constitutive relations of polymers at impact loading on the viscoelastic wave propagation character[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science and Engi-

neering Edition), 1995, 8(3):30-57.

[5] 雷经发,许 孟,刘 涛,等. 聚氯乙烯弹性体静动态力学性能及本构模型[J]. 爆炸与冲击,2020,40(10):63-70.
LEI Jingfa, XU Meng, LIU Tao, et al. Static/dynamic mechanical properties and a constitutive model of a polyvinyl chloride elastomers[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(10): 63-70.

[6] 刘高冲,金 涛,陈圣家,等. 聚氨酯弹性体静动态加载条件下力学性能的研究[J]. 材料导报,2017,31(S1):315-318.
LIU Gaochong, JIN Tao, CHEN Shengjia, et al. Study on mechanical properties of polyurethane elastomers under static/dynamic loading conditions [J]. Materials Reports, 2017, 31 (S1): 315-318.

[7] 杨建兴,张江涛,乔炎亮,等. 硅橡胶动态压缩性能 SHPB 测试方法及其本构模型研究[J]. 高分子通报,2021(4):27-34.
YANG Jianxing, ZHANG Jiangtao, QIAO Yanliang, et al. SHPB test method for the dynamic compressive properties and dynamic constitutive model of silicone rubber [J]. Polymer Bulletin, 2021(4): 27-34.

[8] 林玉亮,卢芳云,卢 力. 高应变率下硅橡胶的本构行为研究[J]. 高压物理学报,2007,21(3):289-294.
LIN Yuliang, LU Fangyun, LU Li. Constitutive behaviors of a silicone rubber at high strain rates[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2007, 21(3): 289-294.

[9] GAMONPILAS C, MCCUISTON R, MCCUISTON R. A non-linear viscoelastic material constitutive model for polyurea[J]. Polymer, 2012, 53(17):3655-3658.

[10] SONG B, CHEN W, CHENG M. Novel model for uniaxial strain-rate-dependent stress-strain behavior of ethylene-propylene-diene monomer rubber in compression or tension[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 92(3):1553-1558.

[11] YANG L M, SHIM V P W. A visco-hyperelastic constitutive description of elastomeric foam[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(8/9):1099-1110.

[12] GHOREISHY M H R. Determination of the parameters of the Prony series in hyper-viscoelastic material models using the finite element method[J]. Materials and Design, 2012, 35:791-797.

[13] 智杰颖,路洪丽,王海庆,等. 基于广义 Maxwell 模型的轮胎橡胶动态压缩性能分析[J]. 高分子学报, 2016, 26(7): 887-894.
ZHI Jieying, LU Hongli, WANG Haiqing, et al. Analysis on dynamic compression performance of tire rubber based on generalized Maxwell model[J]. Acta Polymerica Sinica, 2016, 26(7): 887-894.

[14] 李树虎,贾华敏,李茂东,等. 超弹性体本构模型的理论 and 特种试验方法[J]. 弹性体, 2011, 21(1):58-64.

LI Shuhu, JIA Huamin, LI Maodong, et al. Theory and testing method of hyperelastic material constitutive model [J]. China Elastomerics, 2011, 21 (1) : 58 - 64.

[15] 王礼立, 施绍裘, 陈江瑛, 等. ZWT 非线性热粘弹性本构关系的研究与应用[J]. 宁波大学学报(理工版), 2000, 13 (B12) : 141 - 149.

WANG Lili, SHI Shaoqiu, CHEN Jiangying, et al. Study and application of ZWT nonlinear thermoviscoelastic constitutive relationship[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science and Engineering Edition), 2000, 13 (B12) : 141 - 149.

[16] 黄友剑, 王明星, 张友南. 有限元分析中超弹材料模型采用的弹性体试验[J]. 特种橡胶制品, 2001, 22 (5) : 52 - 55.

HUANG Youjian, WANG Mingxing, ZHANG Younan. Elastomer experiment of superelasticity model by finite element analysis [J]. Special Purpose Rubber Products, 2001, 22 (5) : 52 - 55.

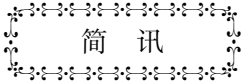
[17] 韦子祥. 燃气轮机隔离系统抗冲减振器动力学特性分析研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.

WEI Zixiang. Dynamic characteristics analysis of shock absorber in gas turbine isolation system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.

[18] 韦子祥, 邱中辉, 陈凯杰, 等. 基于 SHPB 的船用橡胶减振器冲击动力学特性研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38 (4) : 139 - 147.

WEI Zixiang, QIU Zhonghui, CHEN Kaijie, et al. Research on impact mechanical characteristics of ship rubber shock absorber based on SHPB[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38 (4) : 139 - 147.

(王治红 编辑)



中国惠州热电联产发电厂开始运行燃氢燃气轮机

中国国有电力公司广东能源集团 (Guangdong Energy Group) 的热电联产 (CHP) 发电厂采用 9HA.01 燃氢联合循环发电装置发电。该项目预计将向电网提供高达 1.34 GW 的电力, 并为位于中国广东省惠州市的化工厂的工业过程提供蒸汽。

《中国氢能产业中长期发展规划》提出加快向利用可再生能源高效制氢转变, 惠州发电厂预计将成为中国首家使用 GE Vernova 公司燃气轮机氢混合天然气设施的发电厂。GE Vernova 在全球拥有 120 多台完全或部分使用氢燃料的机组, 累计运行时间超过 850 万小时。

广东惠州项目是 9HA.01 首个本土化项目, 将由中国哈尔滨电气集团有限公司为该发电厂提供汽轮机、发电机和电厂辅助设备。GE Vernova 在中国开展业务已有 40 多年, 已为约 110 家客户提供了 240 多台燃气轮机, 装机容量为 50 GW。

(孙嘉忆摘译自 <https://www.powerengineeringint.com>)