

# 超分子作用阻尼材料的动态力学模型修正<sup>\*</sup>

段宇星, 赵苗苗, 苏 渤, 董万元

(中国飞机强度研究所 西安, 710065)

**摘要** 研究了超分子作用对材料阻尼性能的影响, 建立具有超分子修正项的分数阶导数 Kelvin-SI 模型。采用模型对材料的动态力学性能进行描述, 研究其在不同环境条件下的性能变化情况。模型可以准确有效地对材料在不同温度(240~420K)、不同频率(1~100Hz)下的存储模量以及损失模量进行描述。未修正的分数阶 Kelvin-Voigt 模型计算的损失模量偏小而存储模量偏大, 拟合程度较差, 拟合度 R-squared 值仅为 0.787 3。修正后的材料模型拟合较好, 拟合度 R-squared 值在 0.98 以上。材料的存储模量以及损耗因子都随着温度的增加逐渐减小, 随频率的增加逐渐增大。模型的各项参数与物理事实相符合, 参数的变化可以对材料的动态力学行为的变化进行正确的描述。

**关键词** 动态力学模型; 分数阶导数模型; 损失模量; 超分子作用

**中图分类号** O326; TH145.4

## 引 言

分数阶导数模型是描述弹性体材料动力学行为的一种数学模型, 可以比较精准地描述材料的本构关系。使用分数阶导数模型可以对黏弹性材料的力学行为进行比较准确的描述。Wang 等<sup>[1]</sup>基于一种新的分数阶导数模型研究了磁敏橡胶智能材料, 并对其动态力学行为进行描述与预测。Yin 等<sup>[2]</sup>对分数阶 Zener 模型进行了修正, 使用该模型在不同温度下研究炭黑填充橡胶的影响, 取得了较好的结果。Meng 等<sup>[3]</sup>建立能够准确预测黏弹性材料变形的分数阶导数模型, 并使用模型预测材料在恒定应变速率下的黏弹性行为。尹应梅等<sup>[4]</sup>基于分数阶导数 Maxwell 模型对沥青混合料的动态黏弹行为进行分析, 得到了较好的应用结果。徐业守等<sup>[5]</sup>从黏弹性材料微观结构出发研究了材料的力学行为, 得到了基于分数阶的微观结构瞄准线性固体模型。李占龙等<sup>[6]</sup>基于时温等效模型与分数阶 Kelvin-Voigt 模型构造了一种在宽温宽频的动态力学材料模型, 并应用分数阶导数模型在参考温度的主曲线进行了验证, 得到了较好结果。

综合以上研究, 分数阶导数模型及其各种修正模型可以在不同程度及范围内对多种材料的黏弹性

力学行为进行描述与预测, 有效真实地表征材料在时域与频域下的力学行为, 并得到了广泛的应用。笔者在研究过程中发现: 对于部分材料, 现有的分数阶导数可以准确有效地描述其动态力学行为; 但是对于某些超分子作用改性后的阻尼材料, 模型虽然可以较准确地描述其存储模量, 却对损失模量无法准确描述。

基于此, 笔者通过研究这类阻尼材料的力学行为与表征方法, 建立能够更准确描述材料动态力学性能的分数阶导数模型, 对模型的参数进行分析, 并使用模型对试验结果进行拟合与验证。

## 1 分数阶导数修正模型的建立

### 1.1 分数阶导数 Kelvin-Voigt 模型

在经典的黏弹性模型中, 理想弹性的固体, 其应力-应变关系服从 Hooke 定律, 即应力与应变成正比; 理想黏性的流体, 其应力-应变关系服从 Newton 流体定律, 即应力与应变的 1 阶导数成正比。将两者串联得到经典的 Maxwell 模型, 两者并联得到经典的 Kelvin-Voigt 模型<sup>[7]</sup>。这两种模型都在一定程度上描述了黏弹性材料的部分力学行为, 但真实的黏弹性材料, 其力学行为应是介于理想弹性与理想

\* 航空科学基金资助项目(2017ZF23)

收稿日期: 2019-08-01; 修回日期: 2019-11-17

黏性之间的,即应变的导数阶数应是介于0与1之间的分数,这个模型被称为 Abel 体<sup>[8]</sup>。3种基本的力学模型及应力-应变关系如图1所示。

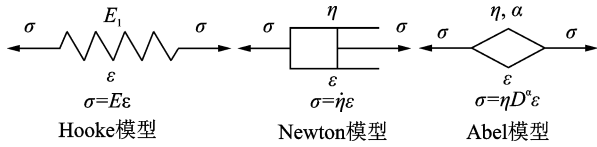


图1 基本力学模型

Fig. 1 The basic mechanical models

Baley 等<sup>[9]</sup>基于分数阶导数提出了描述材料黏弹性力学行为的广义分数阶导数模型,如式(1)所示

$$\sigma(t) + \sum_{m=1}^M b_m D^{\alpha_m} [\sigma(t)] = E_1 \epsilon(t) + \sum_{n=1}^N \eta_n D^{\alpha_n} [\epsilon(t)] \quad (1)$$

其中:  $\sigma(t)$  为应力;  $\epsilon(t)$  为应变;  $E_1$  为模量;  $M, N$  为自然数;  $b_m, \eta_n$  为常数;  $\alpha_m, \alpha_n$  为分子分母互质的实数;  $D^\alpha$  为 Riemann-Liouville 分数阶导数算子<sup>[10]</sup>。

表达式如式(2)所示

$$D^\alpha f(t) = \sum_{k=0}^m \frac{f^{(k)}(a) (t-a)^{-\alpha+k}}{\Gamma(-\alpha+k+1)} + \frac{1}{\Gamma(-\alpha+m+1)} \int_0^t \frac{f^{m+1}(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-m}} d\tau \quad (2)$$

其中:  $\alpha$  为导数阶数,  $m \leq \alpha < m+1$ ,  $m$  为实数。

由前述分析,  $\alpha$  应介于0与1之间。故令  $m=0$ , 式(2)则化简为

$$D^\alpha [\epsilon(t)] = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{\epsilon(\tau)}{(1-\tau)^\alpha} d\tau \quad (3)$$

当  $m=0, n=1$  时, 式(2)表示的广义分数阶导数模型就变成了基于分数阶导数的 Kelvin-Voigt 模型<sup>[10]</sup>, 如式(4)所示

$$\sigma(t) = E_1 \epsilon(t) + \eta D^\alpha [\epsilon(t)] \quad (4)$$

对式(4)进行 Fourier 变换, 有

$$\sigma(\omega) = \mathcal{F}[(E_1 + \eta \frac{d^\alpha}{dt^\alpha}) \epsilon] = (E_1 + \eta (i\omega)^\alpha) \epsilon(\omega) \quad (5)$$

$$E^*(\omega) = \sigma(\omega) / \epsilon(\omega) = E_1 + \eta (i\omega)^\alpha \quad (6)$$

将复模量写作存储模量  $E'(\omega)$  与损失模量  $E''(\omega)$  的形式, 同时使用 Euler 恒等式代换  $(i\omega)^\alpha$ , 代入式(6)中, 即可得到

$$E'(\omega) = E_1 + \eta \omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2) \quad (7)$$

$$E''(\omega) = \eta \omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2) \quad (8)$$

$$\tan\delta(\omega) = \frac{E''(\omega)}{E'(\omega)} = \frac{\eta \omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)}{E_1 + \eta \omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (9)$$

周雄等<sup>[11]</sup>基于式(7)~(9)的分数阶 Kelvin-Voigt 模型研究了普通硫化橡胶的动态力学性能, 结

果显示, 模型可以较好地描述橡胶材料在不同温度下和较宽频率范围内的动态黏弹性力学行为。图2为模型对橡胶材料存储模量以及损失模量的拟合曲线。

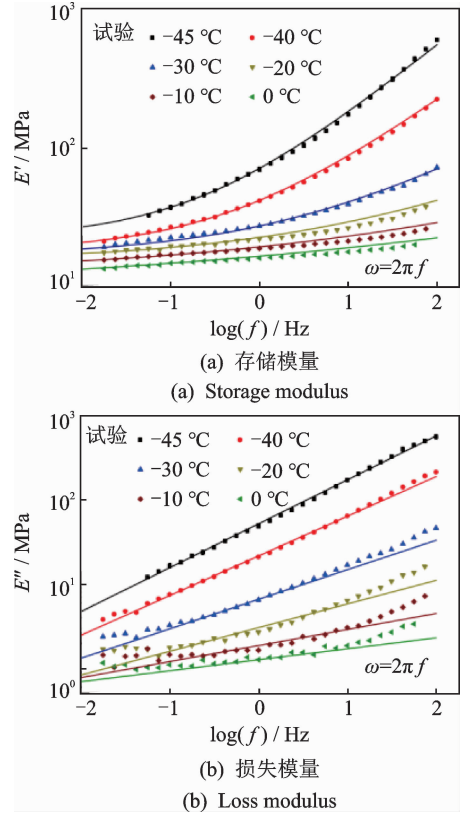


图2 不同温度下 Kelvin-Voigt 模型的拟合曲线

Fig. 2 The Kelvin-Voigt model fitted curves at various temperature

## 1.2 超分子作用阻尼材料修正模型的建立

超分子是一种弱的分子间相互作用, 例如氢键、离子键、金属配位键、 $\pi$ - $\pi$  堆叠以及主客体相互作用等。在动态外力下非共价键可以发生可逆的断裂与再键合, 从而吸收大量能量, 增加材料的内耗来提高其阻尼性能。从分子间作用力来理解材料的力学行为, 可以认为材料分子链之间的交联化学键等较强的相互作用力是产生材料弹性力学行为的原因, 而材料分子链之间的超分子作用力等较弱的相互作用力是产生材料黏性力学行为的原因<sup>[12]</sup>。

赵云峰等<sup>[13]</sup>通过给丁腈橡胶(NBR)中添加酚醛与受阻酚(AO60), 研究发现 AO60 与 NBR 组成的超分子氢键作用具有比较好的阻尼作用。Croisier 等<sup>[14]</sup>对寡肽对聚异丁烯(PIB)进行改性形成了互穿超分子网络的材料结构, 研究发现材料在很宽的频率范围内具有较好的阻尼性能。Noro 等<sup>[15]</sup>用 VEAV 和聚羟基苯乙烯均聚物得到有氢键相互作用的超分子凝胶材料。Liu 等<sup>[16-17]</sup>研究以 9,10-二

氢-9-氧杂-10-磷杂菲-10-氧化物 (DOPO)-多乙烯基硅油 (PMVS) 制得的具有超分子作用的硅橡胶阻尼材料, 阻尼性能显著提升。

对材料进行超分子作用改性后, 材料分子链之间的交联化学键并没有增加, 因此对材料的弹性力学性能影响不大。材料内部基团之间的超分子相互作用大幅提高了材料的阻尼作用, 具体表现为材料的存储模量基本不变而损失模量增加。使用传统的力学对其动态力学行为进行描述时, 虽然可以比较准确地描述其存储模量, 但是材料的损失模量却无法准确描述。为了更精准地表征超分子作用的阻尼材料的力学行为与阻尼行为, 笔者给 Kelvin-Voigt 模型添加了超分子作用的修正项  $E_s$  来对材料的力学行为进行表征。

具体地, 将 Kelvin-Voigt 模型修改为 Kelvin 修正模型 (Kelvin-SI model)

$$E^*(i\omega) = E_1 + \eta(i\omega)^\alpha + iE_s \quad (10)$$

其中:  $E_s$  为超分子作用修正项。

相应的 Kelvin-SI 材料模型存储模量与损失模量为

$$E'(\omega) = E_1 + \eta\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2) \quad (11)$$

$$E''(\omega) = \eta\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2) + E_s \quad (12)$$

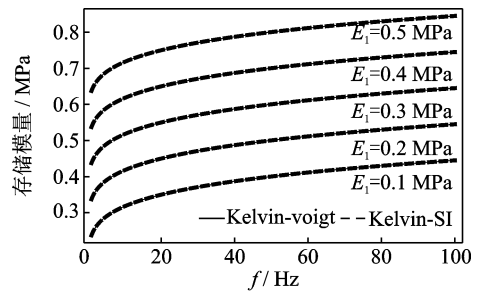
$$\tan\delta(\omega) = \frac{E''(\omega)}{E'(\omega)} = \frac{\eta\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2) + E_s}{E_1 + \eta\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (13)$$

## 2 Kelvin-SI 模型参数分析

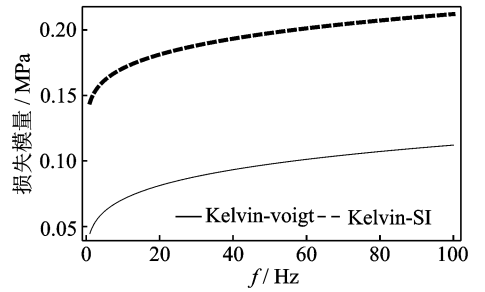
针对 Kelvin-Voigt 模型与 Kelvin-SI 模型, 分别考察其模型参数对材料存储模型与损失模型的影响。对  $E_1$  分别取 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 和 0.5 MPa, 令  $E_s = 0.1$  MPa,  $\eta = 0.1$ ,  $\alpha = 0.2$ , 代入式 (11)、式 (12) 中绘制曲线, 如图 3 所示。修正项  $E_s$  对材料存储模量没有影响, 而损失模量 Kelvin-SI 的计算值则较 Kelvin-Voigt 提高了。随着  $E_1$  取值的增加, 两个模型的存储模量都增加了而损失模量保持不变。同时也发现,  $E_1$  取值变化并不改变曲线的变化趋势, 只是对存储模量的曲线进行平行的移动。

同样地,  $\eta$  分别取 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 和 0.5, 令  $E_1 = 0.2$  MPa,  $E_s = 0.1$  MPa,  $\alpha = 0.2$ , 绘制曲线如图 4 所示。与前述结果相同, 修正项  $E_s$  提高了材料的损失模量而不改变材料的存储模量。随着  $\eta$  取值的增加, 两个模型的存储模量以及损失模量都增加了, 而且  $\eta$  取值越大, 存储模量以及损失模量随频率增加的越快, 模量曲线的曲率越大。

当  $\alpha$  分别取 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 和 0.5 时, 令



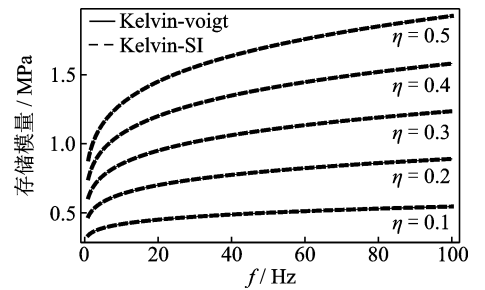
(a) 存储模量  
(a) Storage modulus



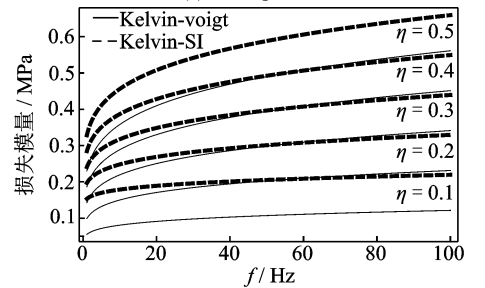
(b) 损失模量  
(b) Loss modulus

图 3  $E_1$  对动态模量的影响

Fig. 3 The effect of  $E_1$  on dynamic moduli



(a) 存储模量  
(a) Storage modulus



(b) 损失模量  
(b) Loss modulus

图 4  $\eta$  对动态模量的影响

Fig. 4 The effect of  $\eta$  on dynamic moduli

$E_1 = 0.2$  MPa,  $E_s = 0.1$  MPa,  $\eta = 0.1$ , 绘制曲线如图 5 所示。与前述结果相同, 修正项  $E_s$  提高了材料的损失模量而不改变材料的存储模量。随着  $\alpha$  取值的增加, 两个模型的存储模量以及损失模量都增加了, 而且  $\alpha$  取值越大, 存储模量以及损失模量随频率

增加的越快,模量曲线的曲率越大。同时也发现, $\alpha$ 取值对模量变化影响比 $\eta$ 大很多,随着 $\alpha$ 的增加,模量随频率的增长幅度在快速增加。 $\alpha$ 控制模量的频率依赖性如下:当 $\alpha$ 取值较小时,材料的模量随频率变化幅度不大,频率依赖性低;当 $\alpha$ 取值较大时,材料的模量随频率变化幅度很大,频率依赖性高。当然 $\eta$ 的取值也控制着材料的频率依赖性,只是相对于 $\alpha$ 来讲影响不甚明显。

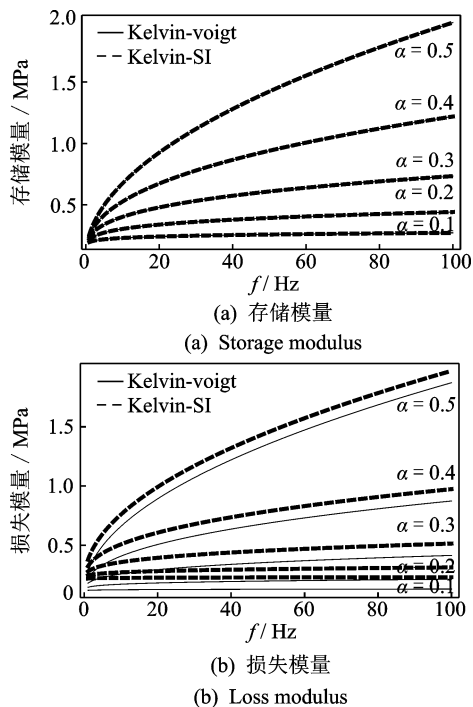


图5  $\alpha$ 对动态模量的影响

Fig. 5 The effect of  $\alpha$  on dynamic moduli

当 $E_s$ 分别取0.1, 0.2, 0.3, 0.4和0.5 MPa,再令 $E_1=0.2$  MPa, $\eta=0.1$ , $\alpha=0.2$ ,绘制曲线如图6所示。修正项 $E_s$ 的改变对材料存储模量没有影响,而随着 $E_s$ 取值的增加,材料的损失模量增加。类似地, $E_1$ 取值变化并不改变损失模量曲线的变化趋势,只是对模量的曲线进行平行的移动。当 $E_s$ 取值为0时,Kelvin-SI模型退化为Kelvin-Voigt模型。

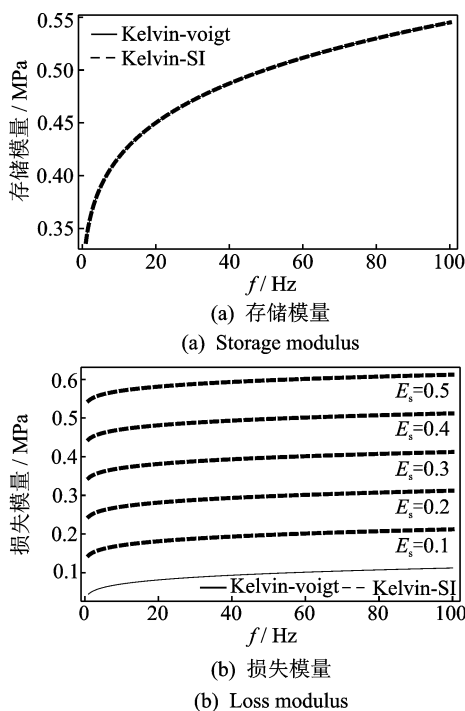


图6  $E_s$ 对动态模量的影响

Fig. 6 The effect of  $E_s$  on dynamic moduli

大体积分子结构与基体材料之间形成 Van der Waals 力。这些不稳定的超分子作用共同实现了材料阻尼性能的提升,形成了超分子作用阻尼材料。DOPO 在材料内部的超分子作用如图7所示。

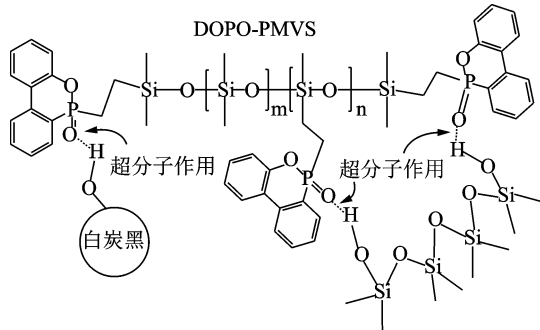


图7 DOPO与Si-OH之间的超分子相互作用

Fig. 7 Supramolecular interaction between DOPO and Si-OH

### 3 动态力学性能测试与分析

#### 3.1 材料试样准备

笔者选用以硅橡胶为基体橡胶,以9,10-二氢-9-氧杂-10-磷杂菲-10-氧化物(DOPO)为超分子作用改性剂制成的DOPO-PMVS PVMQ阻尼硅橡胶材料为试验对象。硅橡胶分子链及其补强剂白炭黑表面存在众多的Si-OH基团,DOPO的P=O键可以通过超分子作用与之形成氢键,同时DOPO本身的

#### 3.2 试验测试准备

试验仪器为美国的TA/DMA850,试验样品为DOPO-PMVS PVMQ硅橡胶材料40HA,试样规格为10 mm×10 mm×2 mm,测量模式为三明治剪切模式,如图8所示。

#### 3.3 试验结果与分析

使用DMA对材料进行动态力学性能测试。测试模式为三明治剪切模式,动态位移为50  $\mu$ m,环境

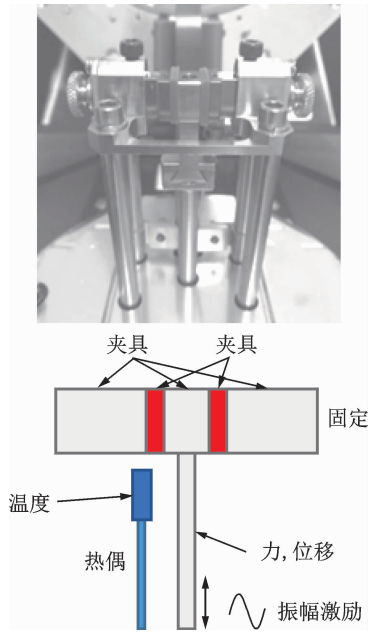


图 8 DMA 夹具与三明治剪切模式

Fig. 8 The DMA clamp and the sandwich shearing mode

温度为 303 K, 试验从 1 Hz 扫频至 100 Hz, 测试结果如图 9 所示。分别使用 Kelvin-Voigt 模型与 Kelvin-SI 模型对试验结果线进行拟合, 拟合参数结果见表 1。

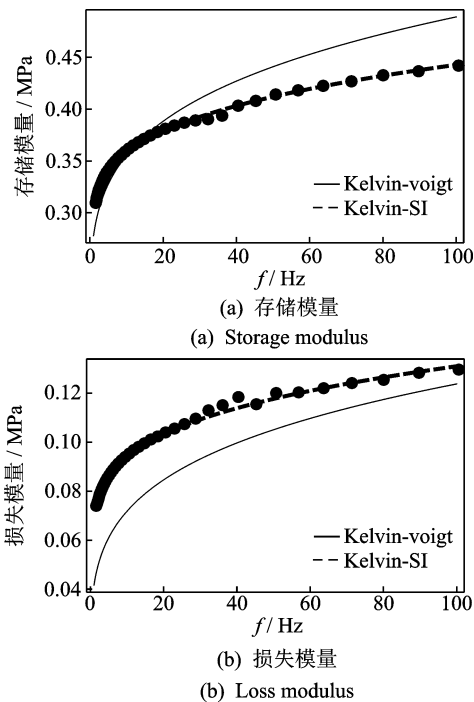


图 9 Kelvin-Voigt 与 Kelvin-SI 模型的拟合曲线

Fig. 9 The Kelvin-Voigt and Kelvin-SI models fitted curves

分别使用 Kelvin-Voigt 与 Kelvin-SI 模型对试验数据进行拟合, 同时拟合材料的存储模量与损失模量。由于模型需要协调两组模量数据, 如果模型的虚部过小而实部过大与试验数据不匹配, 则会导

致模型的实部拟合曲线偏大而虚部拟合曲线偏小, 与试验曲线不重合, 拟合度较差。从表 1 中的拟合结果可以看出, Kelvin-Voigt 模型计算的拟合曲线相对于试验数据来讲, 损失模量偏小而存储模量偏大, 拟合程度较差, 拟合度仅为 0.787 3, 与前述分析情况一致。添加了超分子作用修正项  $E_s$  后的 Kelvin-SI 模型拟合较好, 拟合度为 0.985 2, 表明该模型可以有效地对 DOPO-PMVS PVMQ 硅橡胶材料的动态力学性能进行描述。

表 1 Kelvin-Voigt 与 Kelvin-SI 模型的拟合参数

Tab. 1 The Kelvin-Voigt and Kelvin-SI models fitted parameter values

模型	$E_1/\text{MPa}$	$E_s/\text{MPa}$	$\eta$	$\alpha$	拟合度
Kelvin-Voigt	0.170 8	—	0.074 53	0.236 2	0.787 3
Kelvin-SI	0.256 0	0.050 23	0.038 14	0.259 8	0.985 2

使用 DMA 对材料在不同试验条件下的动态力学性能进行测试。动态位移为  $50 \mu\text{m}$ , 环境温度为  $228 \sim 423 \text{ K}$ , 试验从 1 Hz 扫频至 100 Hz, 测试结果如图 10 所示。使用 Kelvin-SI 模型试验结果进行拟合, 拟合参数结果如表 2 所示。

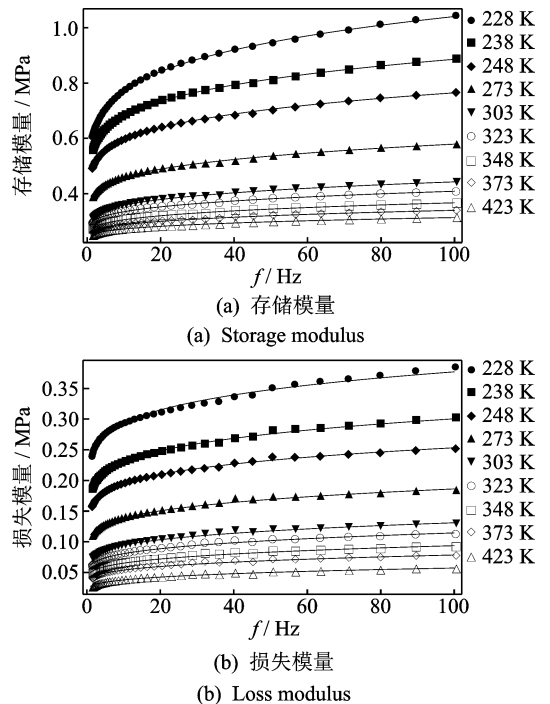


图 10 Kelvin-SI 模型的拟合曲线

Fig. 10 The Kelvin-SI model fitted curves

修正后的分数阶 Kelvin-SI 模型仅通过增加 1 项超分子阻尼作用项即可在较宽的温度及频率范围内准确表征阻尼材料的动态力学性能, 描述精确程度远超普通的分数阶 Kelvin-Voigt 模型。

试验结果表明, 材料的存储模量与损失模量均

随着温度的升高而逐渐降低,随着频率的增加而逐渐增加。这与时温等效原理相符,即材料在高温环境下的动态力学行为与低频环境下等效,在低温环境下的动态力学行为与高频环境下等效。

表2 Kelvin-SI模型的拟合参数

Tab.2 The Kelvin-SI model fitted parameter values

T/K	$E_1$ /MPa	$E_s$ /MPa	$\eta$	$\alpha$	拟合度
228	0.292 7	0.144 00	0.226 90	0.192 3	0.974 2
238	0.358 9	0.119 20	0.143 20	0.210 9	0.983 5
248	0.330 4	0.103 10	0.117 30	0.212 0	0.984 7
273	0.296 7	0.074 71	0.064 99	0.239 3	0.982 1
303	0.256 0	0.050 23	0.038 14	0.259 8	0.985 2
323	0.250 0	0.042 00	0.030 15	0.272 5	0.986 9
348	0.236 9	0.033 28	0.024 12	0.276 6	0.989 1
373	0.229 2	0.026 64	0.020 25	0.278 9	0.990 8
423	0.226 1	0.016 23	0.016 07	0.278 6	0.992 7

对参数分析可知,存储模量的参数  $E_1$ 、超分子作用修正项  $E_s$  与阻尼项  $\eta$  均随温度升高逐渐减小,显然是温度上升导致材料分子链间的相互作用力下降的结果。一般地,随温度增加,橡胶弹性体材料硬度(弹性模量)与阻尼都会下降,可见 Kelvin-SI 模型参数与物理事实相符合。

模型中的分数导数阶数  $\alpha$  随温度逐渐增加,在约 300~423 K 的宽温度范围内基本不发生变化。由 Abel 体的定义分析: $\alpha=0$  代表 Hooke 弹簧; $\alpha=1$  代表 Newton 黏壶。随着  $\alpha$  的增加,材料由弹性体转为黏性体。而橡胶弹性体材料正是如此,温度升高材料趋近于黏流态,温度降低材料趋近于玻璃态。这说明 Kelvin-SI 模型中阶数  $\alpha$  的变化也符合物理事实,材料参数的改变可以对材料状态的改变进行正确的描述。

## 4 结论

1) 超分子作用可以有效地提升材料的阻尼性能,在提高材料的损失模量的同时对存储模量影响不大。Kelvin-Voigt 模型已无法对此类材料进行准确描述,必须对模型进行修正。

2) 采用 DMA 对 DOPO-PMVS PVMQ 阻尼材料的动态力学性能进行测试。测试结果表明,材料的存储模量与损失模量均随着温度的升高而逐渐降低,随着频率的增加而逐渐增加。模型的存储模量参数  $E_1$ 、超分子作用修正项  $E_s$  与阻尼项  $\eta$  均随

温度逐渐减小,分数导数阶数  $\alpha$  随温度逐渐增加,并在约 300~423 K 的宽温度范围内基本不发生变化。各项参数与物理事实相符合,说明了材料参数的改变可以对材料状态的改变进行正确的描述。

3) 修正后的分数阶导数 Kelvin-SI 模型可以准确地对材料的动态力学行为进行表征,模型可以在较宽的频率范围(1~100 Hz)及温度范围(230~420 K)内描述材料的动态力学性能。

## 参 考 文 献

- [1] WANG B C, KARI L. A nonlinear constitutive model by spring, fractional derivative and modified bounding surface model to represent the amplitude, frequency and the magnetic dependency for magneto-sensitive rubber[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019,438 :344-352.
- [2] YIN B Y, HU X L, LUO W B, et al. Application of fractional calculus methods to asymmetric dynamical response of CB-Filled rubber[J]. Polymer Testing, 2017,61:416-420.
- [3] MENG R F, YIN D S, CORINA S. Drapaca, a variable order fractional constitutive model of the viscoelastic behavior of polymers[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2019,113:171-177.
- [4] 尹应梅,张肖宁.基于分数阶导数的沥青混合料动态黏弹行为[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(9):3891-3897.  
YIN Yingmei, ZHANG Xiaoning. Dynamic viscoelastic behavior of asphalt mixtures based on fractional derivative[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2013, 44(9): 3891-3897. (in Chinese)
- [5] 徐业守,徐赵东,葛藤,等.黏弹性材料等效分数阶微观结构标准线性固体模型[J].力学学报,2017,49(5):1060-1069.  
XU Yeshou, XU Zhaodong, GE Teng, et al. Equivalent fractional order micro-structure standard linear solid model for viscoelastic materials [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(5):1060-1069. (in Chinese)
- [6] 李占龙,宋勇,孙大刚.黏弹性材料动态力学性能的分数阶时温等效模型与验证[J].农业工程学报,2017,33(8):90-96.  
LI Zhanlong, SONG Yong, SUN Dagang. Fractional time-temperature superposition model and its validation for dynamic mechanical properties of viscoelastic material[J]. Transactions of the Chinese Society of

- Agriculture Engineering, 2017, 33(8):90-96. (in Chinese)
- [7] 蔡峨. 黏弹性材料基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1989:112-132.
- [8] KEMPFLER S, SCH I, BEYER H. Fractional calculus via functional calculus: theory and applications [J]. Nonlinear Dynamics, 2002, 29(1):99-127.
- [9] BAGLEY R L, TORVIK P J. A theoretical basis for the application of fractional calculus to viscoelasticity [J]. Journal of Rheology, 1983, 27(3):201-210.
- [10] KOELLER R C. Applications of fractional calculus to the theory of viscoelasticity [J]. Journal of Applied Mechanics, 1984, 51(2):299-307.
- [11] 周雄,胡小玲,肖世武. 硫化橡胶动态力学性能的分阶微分 Kelvin 模型[J]. 高分子材料科学与工程, 2012,28(4):187-190.  
ZHOU Xiong, HU Xiaoling, XIAO Shiwu. Application of fractional differential Kelvin model to dynamic mechanical properties of carbon black filled vulcanized rubber[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2012,28(4):187-190. (in Chinese)
- [12] 汪东,张欢,刘文星. 聚合物基阻尼材料的结构设计及功能化研究进展[J]. 中国科学(化学), 2016,46(10):945-960.  
WANG Dong, ZHANG Huan, LIU Wenxing. Recent advances in structure design and functionalization of polymer based damping materials[J]. Scientia Sinica Chimica, 2016,46(10):945-960. (in Chinese)
- [13] 赵云峰,张继华,游少雄. 丁腈橡胶/酚醛树脂/受阻酚 AO60 共混阻尼橡胶贮存稳定性研究[J]. 材料工程, 2010,12:24-29.  
ZHAO Yunfeng, ZHANG Jihua, YOU Shaoxiong. Storage stability of vulcanized acrylonitrile-butadiene/phenolic resin/hindered phenol AO60 damping rubbers[J]. Journal of Materials Engineering, 2010,12:24-29. (in Chinese)
- [14] CROISIER E, SU L, SCHWEIZER T, et al. A toolbox of oligopeptide-modified polymers for tailored elastomers [J]. Nature Communications, 2014, 5:4728-5728.
- [15] NORO A, MATSUSHITA Y, TIMOTHY P L. Gelation mechanism of thermoreversible supramacromolecular ion gels via hydrogen bonding [J]. Macromolecules, 2009, 42:5802-5810.
- [16] LIU B Z, GAO X Y, ZHAO Y F, et al. 9,10-Dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene 10-oxide-based oligosiloxane as a promising damping additive for methyl vinyl silicone rubber (VMQ) [J]. Journal of Materials, 2017, 52(14):8603-8617.
- [17] LIU B Z, GAO X Y, ZHAO Y F, et al. Prospect of 9, 10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene 10-oxide-based oligosiloxane in the preparation of highdamping methyl phenyl vinyl silicone rubbers with broad temperature range [J]. Journal of Materials, 2017, 52(22):13307-13317.



**第一作者简介:**段宇星,男,1987年12月生,工程师。主要研究方向为振动控制与阻尼材料研究。  
E-mail: yuhsing@163.com

## 欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为 EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价 30 元,全年 180 元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街 29 号 邮政编码:210016

电话:(025)84893332

传真:(025)84893332 E-mail: qchen@nuaa.edu.cn

网址: <http://zdc.nuaa.edu.cn>

