

# 粘弹阻尼材料动态本构关系研究

林松<sup>1</sup>, 高庆<sup>2</sup>

(1. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610041; 2. 西南交通大学 应用力学与工程系, 四川 成都 610031)

**摘要:** 对丁基橡胶粘弹阻尼材料进行了不同温度的频率扫描和动态位移扫描实验。基于 RT 模型, 本文提出了改进的 M-RT 模型, 该模型同时考虑了温度、频率和动态位移对材料动态力学行为的影响, 通过与实验结果比较分析, 表明该模型能较好地描述该材料在宽温、宽频和宽动态位移的动态力学行为和预测温度、频率和动态位移对应力-应变迟滞回线的影响。

**关键词:** 丁基橡胶; 粘弹性; 宽温; 宽频; 宽动态位移; 应力-应变迟滞曲线

中图分类号: TH145.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)S1-0584-04

## Dynamic Constitutive Study for Visoelastic Damping Material

LIN Song<sup>1</sup>, GAO Qing<sup>2</sup>

(1. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China; 2. Department of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The tests of frequency sweeping and dynamic displacement sweeping at different temperature for the butyl viscoelastic material were conducted. Based on RT model, M-RT model was proposed to consider the influences of temperature, frequency and dynamic displacement. The comparison between the experimental and predicted results shows that the proposed model in the study can preferably well describe the dynamic constitutive behavior under broad temperature, broad frequency, broad dynamic displacement and predict stress-strain hysteresis loops curves considered the influences of temperature, frequency and dynamic displacement.

**Key words:** butyl; viscoelastic; broad temperature; broad frequency; broad dynamic displacement; stress-strain hysteresis loops curve

目前,粘弹阻尼材料已在火箭、导弹、飞机和电子系统等的振动及噪声控制中得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>,随着应用范围的扩大和深入,温度、频率和动态位移等范围进一步拓宽,环境条件不断恶化,对该类材料的减振和降噪提出了更高的要求。因此,对该类材料进行宽温、宽频和宽动

态位移的动态实验研究及其本构行为的描述是粘弹性阻尼材料研究的前沿课题。

粘弹材料的动态力学行为与温度、频率和动态位移等密切相关<sup>[1-5]</sup>。许多学者采用标准机械模型或分数导数模型分析材料的动态频率响应特性,引入时温等效原理考虑温度的影

响<sup>[3]</sup>;Payne 等研究发现粘弹性材料的动态力学行为具有动态位移相关性,即 Payne 效应<sup>[4]</sup>,常采用损伤模型、Kraus 模型等加以描述<sup>[2]</sup>;但同时考虑温度、频率和动态位移影响的粘弹性动态本构关系的研究很少。

本工作对丁基橡胶粘弹阻尼材料进行不同温度的频率扫描和动态位移扫描实验,基于 RT 模型,提出改进的 M-RT 模型,该模型同时考虑温度、频率和动态位移对材料动态行为的影响。

### 1 动态实验

动态实验使用丁基橡胶,采用直径  $\phi = 10\text{ mm}$ 、高  $h = 15\text{ mm}$  的圆柱形试样。实验仪器为 METRAVIB VA4000 粘弹谱仪,激励模式为拉压模式。分别进行了频率扫描和动态位移扫描实验,实验工况列于表 1。

表 1 实验工况

Table 1 Testing conditions

材料	频率扫描实验 <sup>1)</sup>	动态位移扫描实验 <sup>2)</sup>
丁基橡胶	动态位移 $D = 20\ \mu\text{m}$ 温度 $t = 25, 60,$ $100, 150\ \text{°C}$	频率 $f = 10, 125\ \text{Hz}$ 温度 $t = 25, 40,$ $60, 100, 150\ \text{°C}$

注:1) 频率范围为  $10 \sim 420\ \text{Hz}$

2) 动态位移范围为  $1 \sim 50\ \mu\text{m}$

### 2 同时考虑宽温、宽频和宽动态位移的动态本构关系的建立

粘弹阻尼材料的动态力学行为(储能模量  $E'$ 、耗能模量  $E''$  以及材料损耗因子  $\beta$ )依赖于温度、频率和动态位移,但目前大多数粘弹本构模型只计入了频率的影响,没有考虑温度、动态位移的影响,同时考虑温度、频率和动态位移影响的动态本构关系是此类材料动态行为研究的重要方面。常用的粘弹本构模型有标准机械模型、分数导数模型等。分数导数模型因具有较少的模型参数能较好地描述粘弹材料动态力学行为的特点而被广泛应用<sup>[5]</sup>。因此,可基于分数导数模型,建立同时考虑温度、频率、动态位移影响的粘弹本构模型。现以 3 参数的分数导数模型——RT 模型为例,推导同时考虑温度、频率、动态位移影响的 M-RT 模型,并用丁基橡胶宽温、宽频、宽动态位移的动态实验数据

对其进行实验验证。

RT 模型本构关系<sup>[6]</sup>为:

$$\sigma(t) = \bar{q}_0 \varepsilon(t) + \bar{q}_1 D^{\alpha_1} \varepsilon(t) \quad (1)$$

RT 模型的  $E'$ 、 $E''$  以及  $\beta$ <sup>[6]</sup> 分别表示为:

$$E'(\omega) = \bar{q}_0 + \bar{q}_1 \omega^{\alpha_1} \cos(\pi\alpha_1/2) \quad (2)$$

$$E''(\omega) = \bar{q}_1 \omega^{\alpha_1} \sin(\pi\alpha_1/2)$$

$$\beta(\omega) = \frac{\bar{q}_1 \omega^{\alpha_1} \sin(\pi\alpha_1/2)}{\bar{q}_0 + \bar{q}_1 \omega^{\alpha_1} \cos(\pi\alpha_1/2)}$$

由于 M-RT 模型需同时考虑温度  $t$ 、频率  $\omega$  和动态位移  $D$  的影响,因此,用 RT 模型中参数  $\bar{q}_0$ 、 $\bar{q}_1$ 、 $\alpha_1$  来表征材料动态行为对  $t$ 、 $D$  的依赖性。根据动态位移扫描实验曲线形态可知,当动态位移  $D$  增大到一定程度后,阻尼参数趋于饱和,故  $\bar{q}_0(t, D)$ 、 $\bar{q}_1(t, D)$  采用饱和的指数函数加以表达,为:

$$\begin{aligned} \bar{q}_0(t, D) &= A_1(t) + \frac{A_2(t)}{1 + \exp((D - A_3(t))/A_4(t))}, \\ \bar{q}_1(t, D) &= B_1(t) + \frac{B_2(t)}{1 + \exp((D - B_3(t))/B_4(t))} \end{aligned} \quad (3)$$

其中:  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$  和  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  均为 M-RT 模型参数。

为简化计算,假定模型中的  $\alpha_1$  是仅随温度变化的系数。

### 3 M-RT 模型的实验验证

将丁基橡胶动态实验数据代入式(2),采用非线性最小二乘法,得到的 M-RT 模型参数列于表 2。

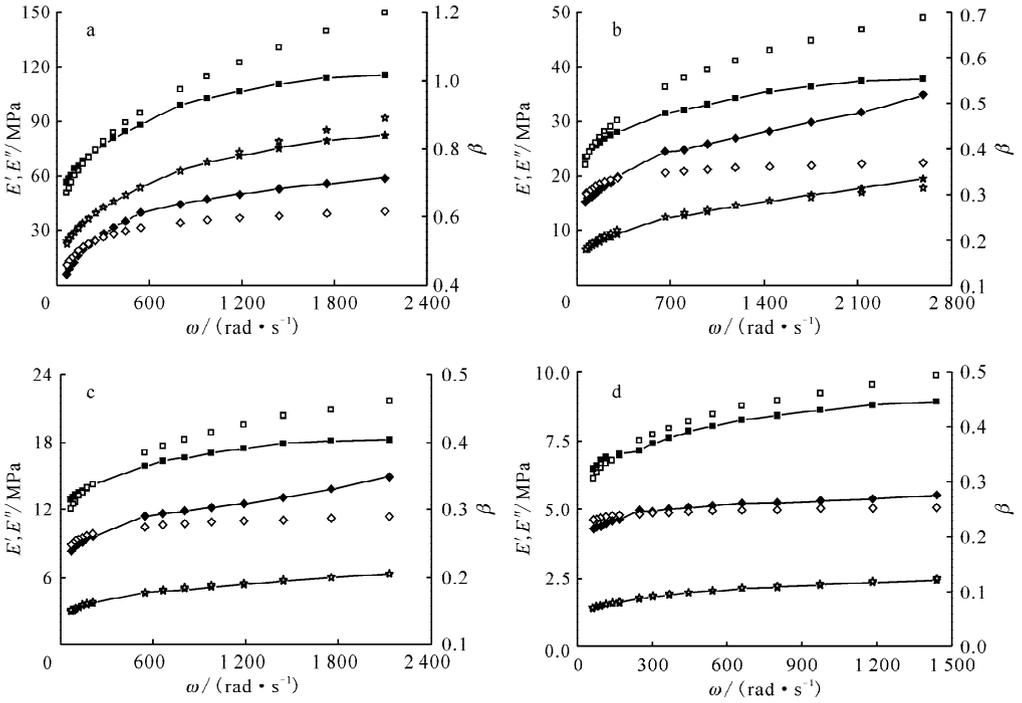
图 1 和 2 分别示出了 M-RT 模型对丁基橡胶复模量频率响应以及动态位移响应的预言与相应实验结果的比较。由图 1 和 2 可见, M-RT 模型可同时较好地描述材料在不同温度的频率响应特性和动态位移响应特性。

### 4 M-RT 模型对材料应力应变迟滞回线的预测

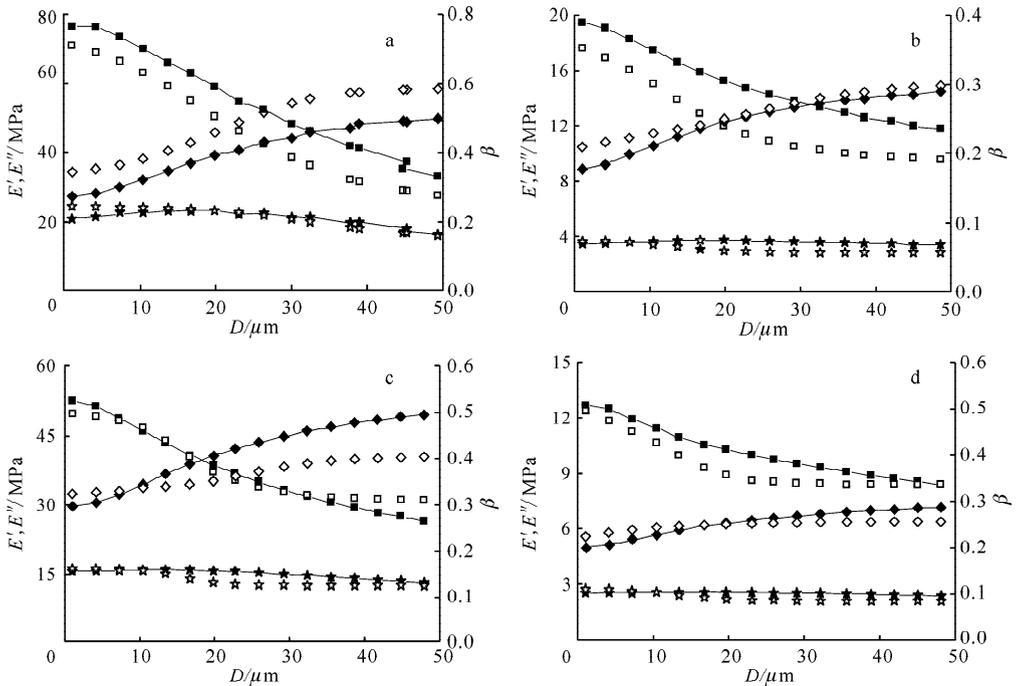
本工作进一步讨论了温度、频率和动态位移对材料损耗能量的影响,即对应力-应变迟滞曲线的影响。

假定动态应变为:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos \omega t \quad (4)$$

图1 不同温度下  $E'$ 、 $E''$  以及  $\beta$  随频率变化的曲线Fig.1  $E'$ ,  $E''$  and  $\beta$  vs  $\omega$  curves under different temperatures

■, ★, ◆——实验值; □, ☆, ◇——预言值; ■, □—— $E'$ ; ★, ☆—— $E''$ ; ◆, ◇—— $\beta$   
 a—— $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; b—— $t=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; c—— $t=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; d—— $t=150\text{ }^{\circ}\text{C}$

图2 不同温度、不同频率下  $E'$ 、 $E''$  以及  $\beta$  随动态位移的变化曲线Fig.2  $E'$ ,  $E''$ ,  $\beta$  vs  $D$  curves under different temperatures and frequencies

■, ★, ◆——实验值; □, ☆, ◇——预言值; ■, □—— $E'$ ; ★, ☆—— $E''$ ; ◆, ◇—— $\beta$

a—— $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $f=10\text{ Hz}$ ; b—— $t=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $f=10\text{ Hz}$ ; c—— $t=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $f=125\text{ Hz}$ ; d—— $t=150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $f=125\text{ Hz}$

表 2 M-RT 模型参数表  
Table 2 M-RT model parameters

$t/^\circ\text{C}$	M-RT 模型参数值	$\alpha_1(t)$
25	$A_1 = 4.362\ 43, A_2 = 35.474\ 89,$	0.39
	$A_3 = 16.076\ 17, A_4 = 7.154\ 93$	
	$B_1 = 5.257\ 85, B_2 = 3.281\ 92,$	0.39
$B_3 = 33.615\ 26, B_4 = 7.708\ 73$		
40	$A_1 = -5.086\ 37, A_2 = 27.691\ 79,$	0.29
	$A_3 = 18.728\ 6, A_4 = 5.380\ 11$	
	$B_1 = 9.602\ 61, B_2 = 2.345\ 61,$	0.29
$B_3 = 30.176\ 21, B_4 = 5.082\ 41$		
60	$A_1 = 1.798\ 6, A_2 = 11.585\ 24,$	0.26
	$A_3 = 18.012\ 24, A_4 = 7.148\ 29$	
	$B_1 = 5.603\ 26, B_2 = 1.605\ 6,$	0.26
$B_3 = 15.387\ 25, B_4 = 2.630\ 82$		
100	$A_1 = 1.005\ 06, A_2 = 8.967\ 87,$	0.21
	$A_3 = 7.778\ 97, A_4 = 11.091\ 15$	
	$B_1 = 3.706\ 24, B_2 = 1.127\ 39,$	0.21
$B_3 = 13.296\ 233, B_4 = 3.769\ 37$		
150	$A_1 = 0.994\ 65, A_2 = 5.510\ 15,$	0.18
	$A_3 = -4.376\ 81, A_4 = 7.839\ 11$	
	$B_1 = 2.326\ 47, B_2 = 0.686\ 81,$	0.18
$B_3 = 13.417\ 15, B_4 = 3.374\ 75$		

式中,应变幅  $\epsilon_0$  与动态位移  $D$ 、试样高度  $h$  有如下关系:

$$\epsilon_0 = D/h \quad (5)$$

将式(4)和表 2 中的模型参数代入本构方程(1)中,可得到材料在宽温、宽频和宽动态位移的动态应力响应。图 3 示出了不同温度、不同频率和不同动态位移的应力-应变迟滞回线。由图 3 可见,随着温度的下降、频率的增加以及动态位移的增大,迟滞曲线所包围的面积越来越大,表明材料的耗散能力增强。

### 6 结论

1) 丁基橡胶的动态行为依赖于温度、频率和动态位移的影响。

2) M-RT 模型不仅能较准确地描述材料在宽温( $-10 \sim 150\ ^\circ\text{C}$ )、宽频( $10 \sim 420\ \text{Hz}$ )和宽动态位移( $1 \sim 50\ \mu\text{m}$ )的动态力学行为,而且采用该模型预测了频率、温度和动态位移对迟滞回线的影响,为阻尼材料在宽温、宽频和宽动态位移条件下的动态力学行为研究及其应用提供了理论基础。

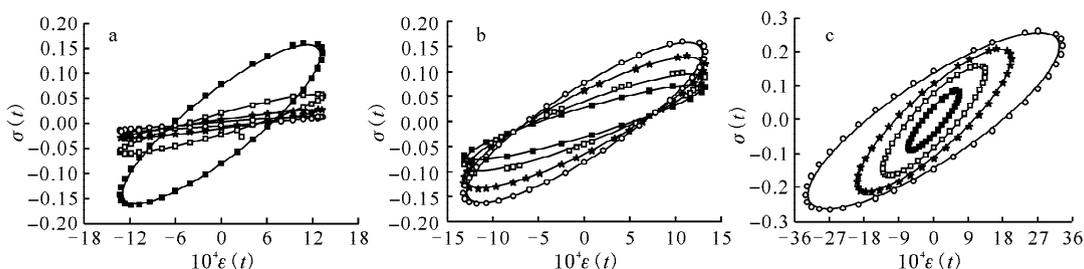


图 3 丁基橡胶材料的应力-应变迟滞曲线

Fig. 3 Stress-strain hysteresis loops curves of viscoelastic materials of butyl

- a, 温度不同:  $\blacksquare$ — $t=25\ ^\circ\text{C}$ ,  $\square$ — $t=60\ ^\circ\text{C}$ ,  $\star$ — $t=100\ ^\circ\text{C}$ ,  $\circ$ — $t=150\ ^\circ\text{C}$ ;  
 b, 频率不同:  $\blacksquare$ — $f=10\ \text{Hz}$ ,  $\square$ — $f=30\ \text{Hz}$ ,  $\star$ — $f=70\ \text{Hz}$ ,  $\circ$ — $f=125\ \text{Hz}$ ;  
 c, 动态位移不同:  $\blacksquare$ — $D=10\ \mu\text{m}$ ,  $\square$ — $D=20\ \mu\text{m}$ ,  $\star$ — $D=30\ \mu\text{m}$ ,  $\circ$ — $D=50\ \mu\text{m}$

### 参考文献:

[1] 戴德沛. 阻尼减振降噪技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,1986.  
 [2] 杨挺青, 罗文波, 徐平, 等. 粘弹性理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2004.  
 [3] O'DOWD N P, KNAUSS W G. Time dependent large principal deformation of polymers[J]. J Mech Phys Solids, 1995, 43(5): 771-792.  
 [4] PETRONE F, LACAGNINA M, SCIONTI M. Dynamic characterization of elastomers and iden-

tification with rheological models[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 271: 339-363.  
 [5] METZLER R, NONNENMACHER T F. Fractional relaxation processes and fractional rheological models for the description of a class of viscoelastic materials [J]. International Journal of Plasticity, 2003, 19: 941-959.  
 [6] 陈前. 弹性-粘弹性复合结构动力学研究[D]. 成都:中国核动力研究设计院,1987.