

# 宽温宽频宽动态位移下 ZN - 33 材料的黏弹行为

林松<sup>1</sup> 杨显杰<sup>1</sup> 高庆<sup>1</sup> 赵云峰<sup>2</sup> 游少雄<sup>2</sup>

(1 西南交通大学应用力学与工程系,成都 610031)

(2 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 对 ZN - 33 黏弹阻尼材料进行温度、频率和动态位移的扫描实验和不同温度、载荷下蠕变实验。研究了材料在宽温、宽频、宽动态位移下的动态阻尼特性。得到了 ZN - 33 材料复模量和损耗因子随温度、频率和动态位移变化的规律。同时对该材料的蠕变特性进行了研究,揭示其蠕变行为的非线性特性,进行了蠕变柔量的时间—应力等效性描述。

**关键词** ZN - 33,温度,频率,动态位移,蠕变,时间—应力等效

## Viscoelastic Behaviors for ZN - 33 Damping Material at Broad Temperature, Frequency and Dynamic Displacement

L in Song<sup>1</sup> Yang Xianjie<sup>1</sup> Gao Qing<sup>1</sup> Zhao Yunfeng<sup>2</sup> You Shaoxiong<sup>2</sup>

(1 Department of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

(2 Research Institute of Aerospace Materials and Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** In this paper, the scan tests under different temperature, frequency, dynamic displacement and creep tests under different temperature and loads are conducted. The dynamic damping property of visco-elastic damping material ZN-33 at broad range of temperature, frequency and dynamic displacement is investigated. The evolutions of the complex modulus and the loss factor are investigated under different temperature, frequency and dynamic displacement. Creep analysis of ZN-33 is conducted to reveal nonlinear property and time-stress equivalence description of creep compliance is investigated.

**Key words** ZN-33, Temperature, Frequency, Dynamic displacement, Creep, Time-Stress equivalence

### 1 引言

黏弹性阻尼材料广泛应用于航空、航天、仪器仪表等减振降噪中<sup>[1-5]</sup>,但其阻尼性能极大地依赖于温度、频率、动态位移等环境因素。研究表明,随着温度的升高或频率的降低,该材料经历玻璃态、黏弹态和橡胶态三区<sup>[1]</sup>;Payne发现,该材料在动态情况下发生 Payne效应<sup>[4]</sup>,即动态力学特性的动态位移特性。目前宽温、宽频和宽动态位移等环境因素对这类材料阻尼性能影响的动态实验研究在国内外已成为重点。阻尼材料的蠕变性能明显地依赖于温度;当阻尼材料为非线性黏弹性材料时,不同加载应力水平下的蠕变行为有所不同,表现为蠕变柔量与加载应力水平的相

关性<sup>[6-9]</sup>。动态实验是研究动态谐变作用下材料黏弹行为对频率、温度以及动态位移等因素的依赖性,蠕变实验是研究材料在准静态条件下的黏弹行为<sup>[4]</sup>。本文对黏弹性阻尼材料 ZN - 33 进行宽温、宽频和宽动态位移下的动态实验和不同温度、不同应力水平下的蠕变实验,研究温度、频率和动态位移对材料动态阻尼特性的影响,分析材料的非线性蠕变特性,并对非线性蠕变行为进行蠕变柔量的时间—应力等效性描述,从而为材料应用于工程实际阻尼减振和其本构关系的建立提供坚实的实验基础。

### 2 实验

#### 2.1 动态实验

收稿日期:2006-09-26;修回日期:2007-01-29

作者简介:林松,1979年出生,博士研究生,从事材料本构关系及阻尼结构的优化设计分析研究

本实验使用的 ZN - 33 阻尼材料是以硅橡胶为基体的共混型黏弹性阻尼材料。圆柱形试样的直径  $d = 10 \text{ mm}$ , 高  $h = 15 \text{ mm}$ 。实验仪器是 METRAV B VA4000 黏弹谱仪 (温度范围  $-150 \sim 450$ , 频率范围  $0.001 \sim 1000 \text{ Hz}$ , 动态位移可达到  $\pm 6000 \mu\text{m}$ ), 采用拉压激励模式。实验控制和实验数据采集都由计算机来实现。

黏弹性阻尼材料是一种既能损耗能量, 又能贮存能量的材料。在承受交变载荷时, 其应变滞后于应力, 形成迟滞曲线, 所包围的面积就是耗散的能量。黏弹性阻尼材料的模量  $E$  可用复数表示为

$$E = E' + jE'' \quad (1)$$

$$= E' / E'' \quad (2)$$

式中,  $E'$  为材料的贮能弹性模量,  $E''$  为材料的耗能弹性模量,  $\tan \delta$  为材料的损耗因子, 是衡量阻尼材料耗散振动能量的主要指标之一。通过动态实验, 可得到温度、频率、动态位移与  $E'$  和  $E''$  的关系, 通过式 (2) 可计算出  $\tan \delta$ 。

为全面揭示 ZN - 33 材料的动态阻尼特性, 对材料进行了频率扫描 (在一定动态位移和温度下测量不同频率时材料的动态阻尼性能)、动态位移扫描和温度扫描实验。动态实验的工况如表 1 所示。

表 1 动态实验工况

Tab 1 Dynamic testing conditions

动态实验	实验条件
频率扫描实验	动态位移: $20 \mu\text{m}$ , 温度: $-50, -10, 25, 60, 100, 150$
动态位移扫描实验	频率: $10, 125 \text{ Hz}$ , 温度: $-10, 0, 25, 40, 60, 100, 150$
温度扫描实验	频率: $125 \text{ Hz}$ , 动态位移: $20 \mu\text{m}$

## 2.2 蠕变实验

蠕变实验采用的实验仪器是 METRAV B VA4000 黏弹谱仪, 采用压缩激励模式。试样的直径  $d = 10 \text{ mm}$ , 高  $h = 15 \text{ mm}$ 。对 ZN - 33 进行了不同温度和不同应力下的蠕变实验, 实验工况见表 2。

表 2 蠕变实验工况

Tab 2 Creep testing conditions

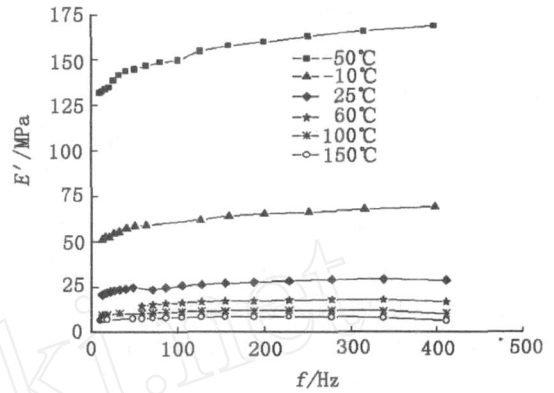
温度 /	控制应力 /kPa	保持时间 /s
25	12.2, 24.5, 36.7, 42.8	500
60	13.5, 27.0, 36.5	500
100	12.7, 25.5, 34.4	500
150	12.7, 25.5, 34.4	500

## 3 结果及讨论

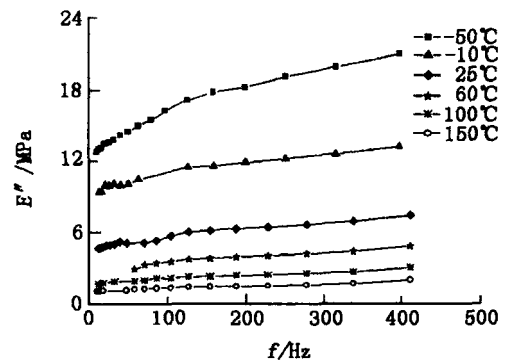
### 3.1 动态实验

#### 3.1.1 频率响应

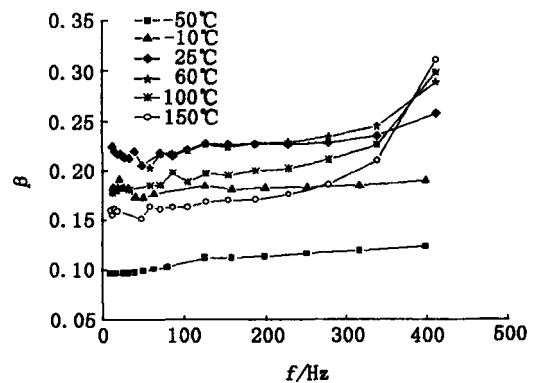
图 1 给出了 ZN - 33 在动态位移  $D$  为  $20 \mu\text{m}$  时, 温度分别为  $-50, -10, 25, 60, 100$  和  $150$  时  $E'$ 、 $E''$  以及  $\tan \delta$  随频率  $f$  ( $10 \sim 400 \text{ Hz}$ ) 的变化规律。



(a)  $E'$



(b)  $E''$



(c)

图 1 不同温度下  $E'$ 、 $E''$  和  $\tan \delta$  随  $f$  的变化曲线

Fig 1  $E'$ 、 $E''$  and  $\tan \delta$  vs  $f$  curves under different  $T$

由图 1 (a) ~ (b) 可见, 在恒定温度下, 材料 ZN - 33 在开始较小的频率阶段,  $E'$ 、 $E''$  随着频率的增大而增大, 之后在  $100 \sim 420 \text{ Hz}$  范围内,  $E'$ 、 $E''$  变化趋势趋

于平缓。

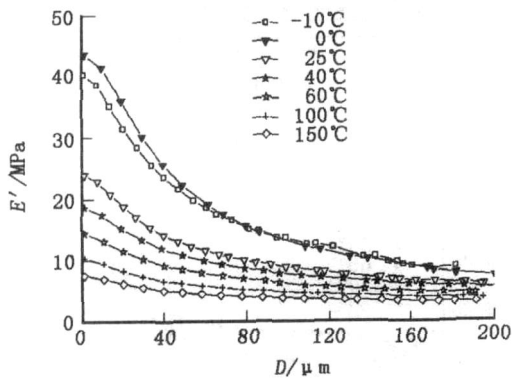
由图 1(c)可见,在恒定温度下,材料在 1 ~ 300 Hz 范围内, 随频率的增加而变化不大;在频率大于 300 Hz 后, 随频率有明显的增长趋势,特别在高温, 材料有进入黏弹态区的趋势。

### 3.1.2 动态位移响应

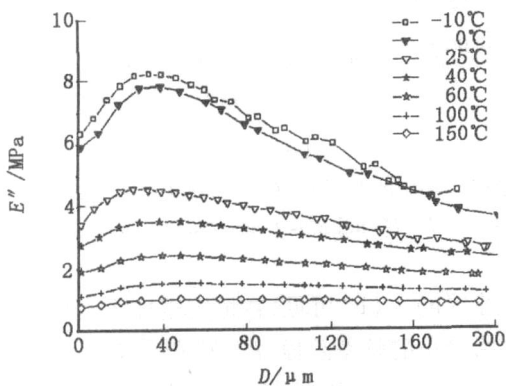
对 ZN - 33 进行了频率  $f$  为 10、125 Hz 下不同温度时的动态位移扫描实验,  $E'$ 、 $E''$  以及  $\beta$  的动态位移响应曲线如图 2 所示。

在 -10 ~ 150 °C 内,由图 2(a) ~ (b)可知,随着  $D$  的增加,  $E'$  迅速减小,  $E'$  在  $D$  在 20 ~ 60  $\mu\text{m}$  范围内经历一峰值,在峰值的左边,  $E'$  随  $D$  的增加而增大,在峰值的右边,  $E'$  随  $D$  的增加而减小。随着温度的升高,  $E'$ 、 $E''$  对  $D$  的敏感度逐步减小。由图 2(c)可见,在频率  $f=10$  Hz 条件下, 在  $D$  较小时增加较快,  $\beta$  随  $D$  的增大而衰减,当  $D$  增加到 120  $\mu\text{m}$  后, 趋于饱和;随后随着温度的升高,  $\beta$  随  $D$  的变化趋于平缓。

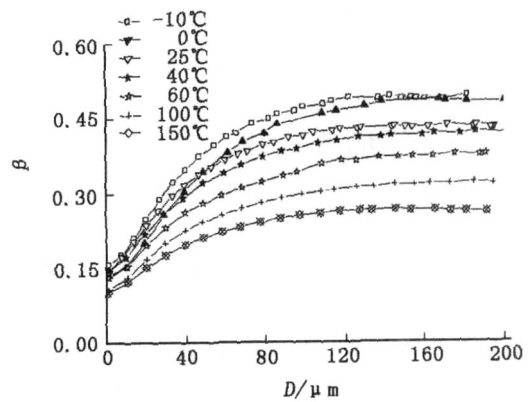
综合图 2(a) ~ (c)可见,在频率为 10 Hz 时,材料  $E'$ 、 $E''$  以及  $\beta$  在 -10 ~ 150 °C 温度范围和 120 ~ 200  $\mu\text{m}$  动态位移范围内随动态位移的变化小,可认为在此范围内,动态位移不影响 ZN - 33 的动态阻尼性能。



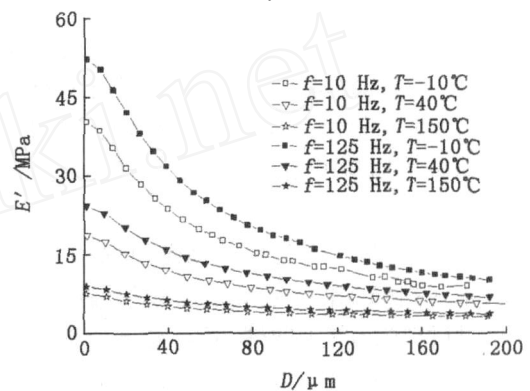
(a)  $E'$  ( $f=10$  Hz)



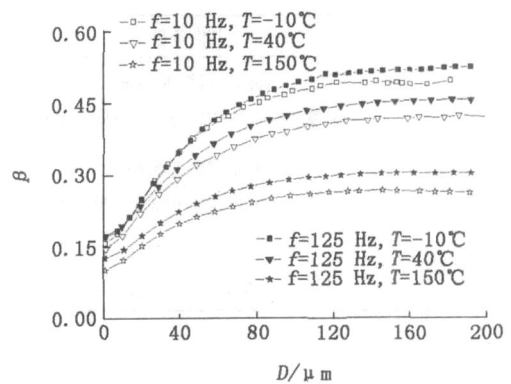
(b)  $E''$  ( $f=10$  Hz)



(c) ( $f=10$  Hz)



(d)  $E'$  ( $f=10$  Hz, 125 Hz)



(e) ( $f=10$  Hz, 125 Hz)

图 2  $E'$ 、 $E''$  和  $\beta$  随  $D$  的变化曲线

Fig 2  $E'$ 、 $E''$  and  $\beta$  vs  $D$  curves

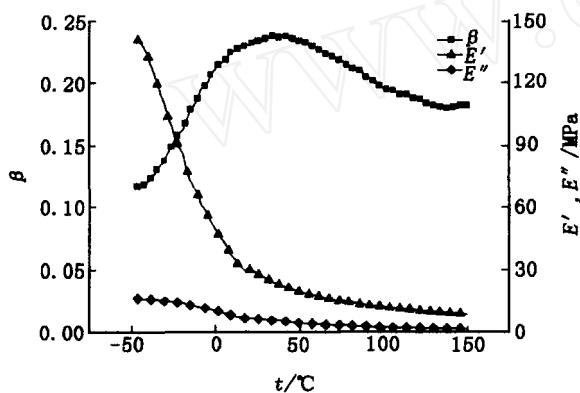
图 2(d) ~ (e)给出了不同温度时,频率分别为 10 和 125 Hz 下  $E'$ 、 $\beta$  随  $D$  的变化曲线。由图可知,在相同温度下,频率分别为 10 和 125 Hz 时,  $E'$ 、 $\beta$  随  $D$  的变化规律一样;但在频率为 10 Hz 时的  $E'$ 、 $\beta$  都低于 125 Hz 时的值,即正如图 1(a)和图 1(c)所示频率较高时 ZN - 33 有较大的  $E'$ 、 $\beta$ 。当频率为 125 Hz 时,在 -10 ~ 150 °C 温度范围和 120 ~ 200  $\mu\text{m}$  动态位移范围内,  $E'$ 、 $\beta$  同样随  $D$  的变化不大,故仍可认为  $D$  不影响 ZN - 33 的动态阻尼性能。

### 3.1.3 温度响应

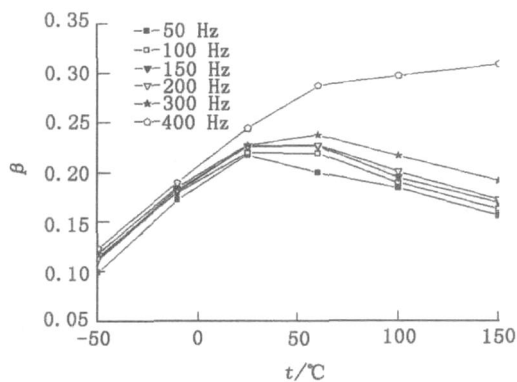
对 ZN - 33 进行了频率  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $D = 20 \mu\text{m}$  时温度扫描实验, 实验曲线见图 3。

由图 3(a)可见, 随着温度的上升,  $E'$ 、 $E''$  呈现衰减趋势; 当温度达到 50 后, 衰减趋势变缓。在约 46 左右温度时达到峰值, 此时对应的温度称为玻璃态转变温度  $T_g$ ; 在温度小于  $T_g$  时, 随着温度的升高而增加, 在温度大于  $T_g$  时, 随着温度的升高而迅速下降;  $T_g$  附近应是 ZN - 33 比较适宜的减振工作温度范围。ZN - 33 在该实验工况下处于黏弹态区。

取出图 1(c)材料损耗因子  $\beta$  在不同温度下的频率扫描实验数据得到材料在动态位移为  $20 \mu\text{m}$  时, 不同频率下的温度响应曲线, 如图 3(b)所示。从图可以看出, ZN - 33 的峰值点随着  $f$  的增大, 峰值点向高温方向移动, 而且峰值  $\beta_{\text{max}}$  也随着频率的增加而增大。



(a)  $E'$ 、 $E''$  和  $\beta$  ( $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $D = 20 \mu\text{m}$ )



(b) ( $D = 20 \mu\text{m}$ )

图 3  $E'$ 、 $E''$  和  $\beta$  随温度的变化曲线

Fig 3  $E'$ 、 $E''$  and  $\beta$  vs  $T$  curves

## 3.2 蠕变实验结果及时间—应力等效描述

### 3.2.1 蠕变实验结果

图 4 给出温度为 25、应力为 12.2 kPa 下的蠕

变应变  $\epsilon^c$  曲线。由图可见, ZN - 33 的蠕变曲线经历了三个阶段。第一阶段为瞬态变形阶段, 一旦加上载荷, 试样立即产生瞬时应变; 第二阶段为非稳定蠕变阶段, 蠕变速率变化较大; 第三阶段为稳定蠕变阶段, 蠕变速率为一恒定值。

由线性黏弹性理论可知:

$$\epsilon^c = J \cdot \sigma \quad (3)$$

式中,  $J$  为蠕变柔量,  $\sigma$  为控制应力。

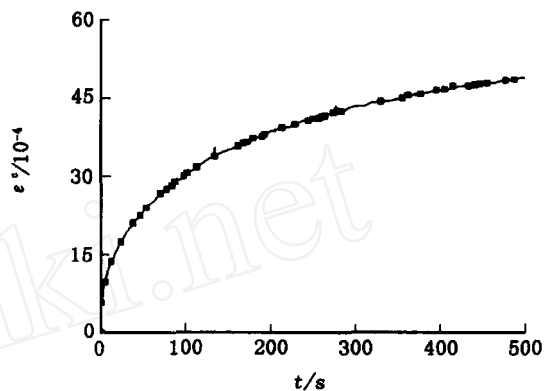
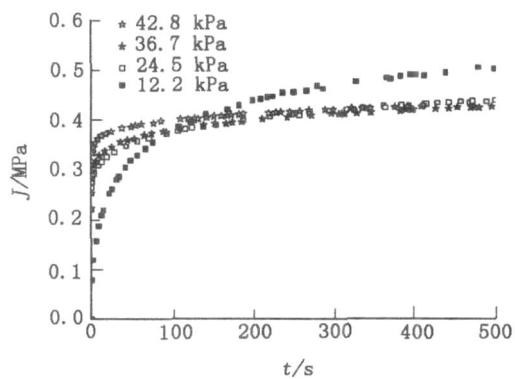


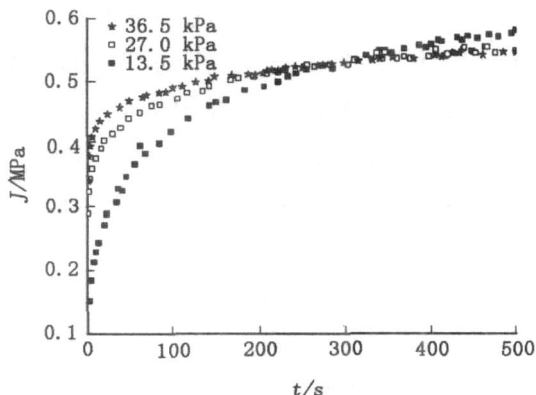
图 4 25 时的蠕变曲线

Fig 4 Creep curve at 25

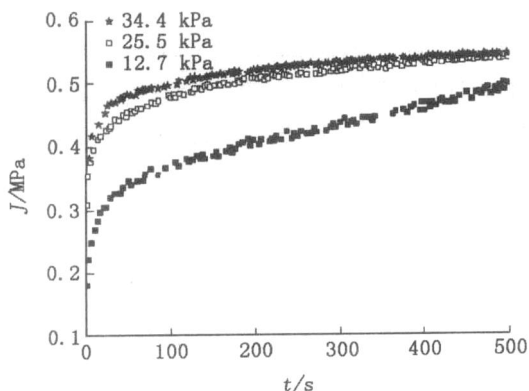
图 5 为 ZN - 33 在不同温度下不同应力水平的蠕变柔量曲线。



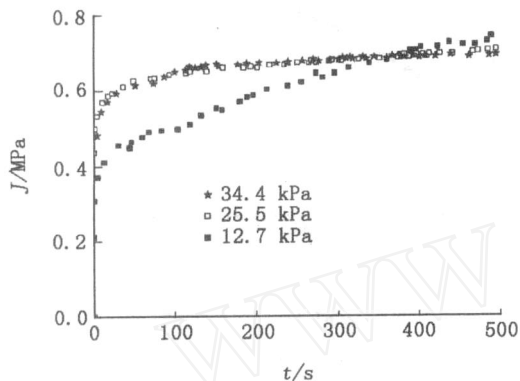
(a) 25



(b) 60



(c) 100



(d) 150

图 5 不同温度时蠕变柔量曲线

Fig 5 Creep curves under different T

由图可见,温度、应力都会影响材料的蠕变柔量  $J$ ;不同温度时,在应力较大范围内的  $J-t$  曲线相差较小,且时间越长,曲线越趋于一致;而应力水平最小的  $J-t$  曲线与其他曲线相差较大。这表明在应力较大时可用单一的  $J-t$  曲线表征其蠕变行为,即可用线性黏弹性模型近似表征;而应力较小时,ZN-33 的蠕变应变具有应力相关性,表现出非线性黏弹性特征。

### 3.2.2 蠕变柔量的时间—应力等效性分析

材料不满足线性黏弹性关系时,不同加载应力水平下的蠕变行为将有所不同,各应力水平下的蠕变柔量曲线不相重合,表明蠕变行为呈现非线性。此时可采用时间—应力等效原理<sup>[10]</sup>,分析材料在不同温度、不同应力下的非线性蠕变行为,得到某参考应力  $\sigma_0$  水平下的等效蠕变柔量主曲线。

依自由体积理论,材料的黏度与自由体积分数之间满足 Doolittle 方程<sup>[4]</sup>:

$$\ln \eta = \ln A + B(1/f - 1) \quad (4)$$

式中,  $A$ 、 $B$  为材料常数,自由体积分数  $f$  可表示为:

$$f = V_f/V \quad (5)$$

式中,  $V_f$  为材料中空穴体积,  $V$  为材料总的宏观体积。

时间—温度等效原理通过引入考虑温度影响的温度移位因子得到某温度下的黏度,并保证温度变化后材料自由体积的等效来反映该材料在不同时间尺度上的力学行为,这是热黏弹性理论研究中的基本方法之一。若材料的自由体积分数与温度的改变存在线性关系:

$$f = f_0 + \alpha_T(T - T_0) \quad (6)$$

式中,  $\alpha_T$  为自由体积分数的线胀系数,  $f_0$  为材料在参考温度  $T_0$  下的自由体积分数。

温度移位因子  $a_T$  定义为:

$$a_T = \eta_0 / \eta \quad (7)$$

式中,  $\eta_0$  为材料在参考温度  $T_0$  下的黏度。

综合式 (4) ~ 式 (7), 温度移位因子  $a_T$  可写为 WLF 方程<sup>[4]</sup>:

$$\lg a_T = -\frac{B}{2 + 303(f_0 - f_0/\alpha_T + T - T_0)} = -\frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \quad (8)$$

式中,  $C_1$ 、 $C_2$  为材料常数。

时间—应力等效原理认为,应力水平和温度对材料自由体积产生相似的影响,因此,可将不同应力水平下的蠕变柔量  $J(t)$  曲线通过移位而得到某参考应力  $\sigma_0$  水平下的一条主曲线。应力移位因子可分为水平移位因子  $a$  和垂直移位因子  $b$ 。在图 6 中,沿时间轴的  $a$  和沿蠕变柔量轴的  $b$  表示为<sup>[11-12]</sup>:

$$\lg a = -\frac{C_1(\sigma - \sigma_0)}{C_2 + (\sigma - \sigma_0)},$$

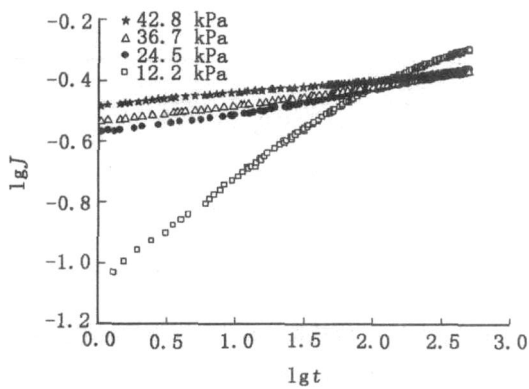
$$\lg b = -\frac{D_1(\sigma - \sigma_0)}{D_2 + (\sigma - \sigma_0)} \quad (9)$$

式中,参数  $C_1$ 、 $C_2$  和  $D_1$ 、 $D_2$  可通过对实验数据进行非线性拟合求出。

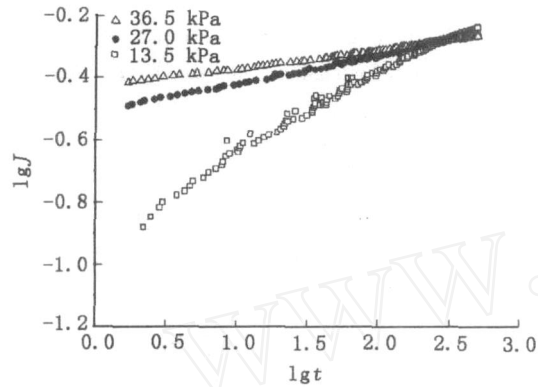
不同应力水平下蠕变柔量  $J(t)$  即可写为:

$$J(t, \sigma) = b \cdot J(t/a, \sigma_0) \quad (10)$$

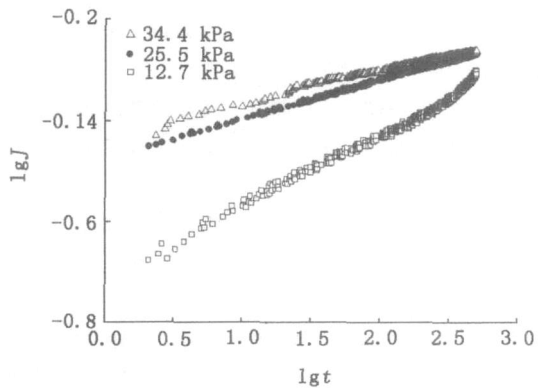
根据 ZN-33 材料的蠕变实验工况,将不同温度、不同应力下  $J-t$  曲线用双对数坐标显示,见图 6。在 25 °C 时,任选  $\sigma_0 = 24.5$  kPa 为参考应力,将图 6(a) 中其他 3 个应力水平下的蠕变柔量作适当的水平移位和垂直移位,可得到应力为 24.5 kPa 时蠕变柔量主曲线,见图 7(a),其相应的水平移位因子和垂直移位因子分别用式 (9) 进行非线性拟合,其他参数  $C_1$ 、 $C_2$  以及  $D_1$ 、 $D_2$  的值见表 3。其他温度下某一参考应力下蠕变柔量主曲线见图 7(b)、(c) 和 (d)。



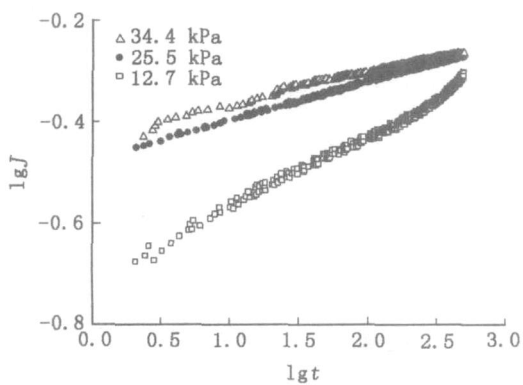
(a)  $T=25$



(b)  $T=60$



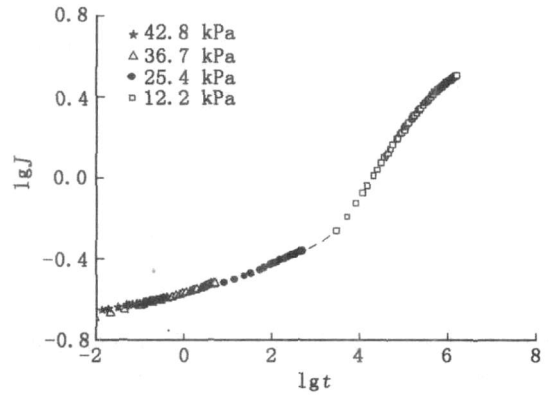
(c)  $T=100$



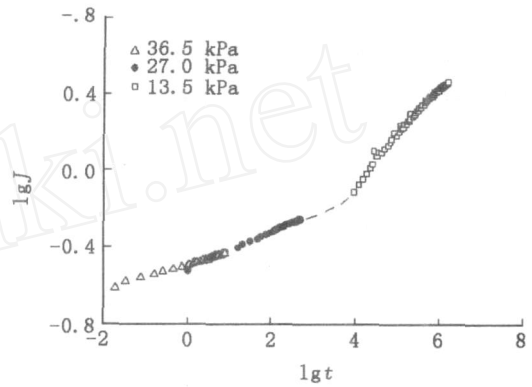
(d)  $T=150$

图 6 不同应力下蠕变柔量曲线

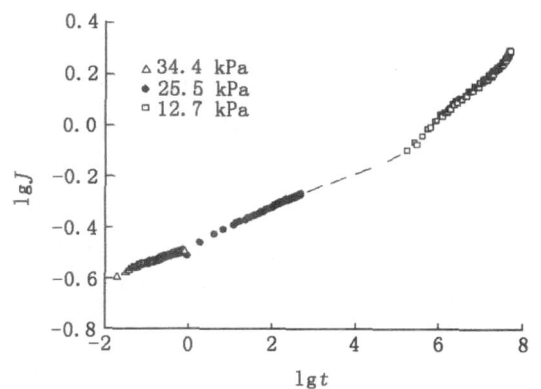
Fig 6 Creep compliance curves under different stress



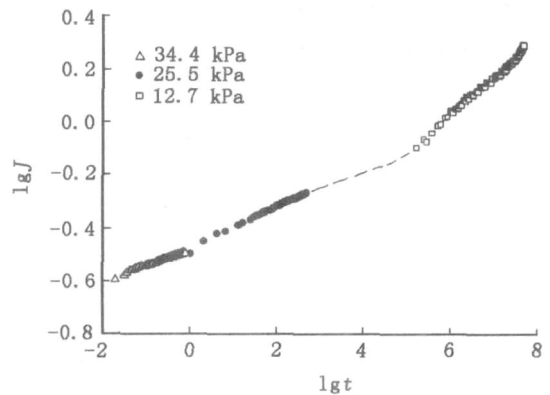
(a)  $\sigma_0 = 24.5 \text{ kPa}, T = 25$



(b)  $\sigma_0 = 27.0 \text{ kPa}, T = 60$



(c)  $\sigma_0 = 25.5 \text{ kPa}, T = 100$



(d)  $\sigma_0 = 25.5 \text{ kPa}, T = 150$

图 7 蠕变柔量主曲线与时间的关系曲线

Fig 7 Main curve of creep compliance vs time

表 3 参数值表

Tab 3 Parameters value

参考温度 /	参考应力 /kPa	拟合参数值
25	24.5	$C_1 = -11.12447, C_2 = 0.0515, D_1 = -0.42115, D_2 = 0.01878$
60	27.0	$C_1 = -16.18994, C_2 = 0.07595, D_1 = -0.62847, D_2 = 0.02562$
100	25.5	$C_1 = -35.08083, C_2 = 0.10261, D_1 = -1.24983, D_2 = 0.03946$
150	25.5	$C_1 = -3.16403, C_2 = 0.0263, D_1 = -0.09916, D_2 = 0.01316$

由图 6 可见,本文通过时间—应力等效原理对 ZN-33 在相同温度下不同应力的多条蠕变柔量曲线进行移位,得到了一条在该温度和某参考应力下的等效蠕变柔量主曲线,见图 7。该曲线的时间范围拓宽了,可用来预测材料较长期的蠕变行为,这对研究黏弹阻尼材料力学行为以及寿命评估都具有重要价值。

#### 4 结论

(1)频率扫描实验显示,在频率大于 100 Hz 后,ZN-33 材料有进入黏弹态区的趋势;

(2)动态位移扫描实验表明在动态位移处于 120~200  $\mu\text{m}$  范围内,动态位移基本上不影响 ZN-33 材料的动态阻尼性能;

(3)温度扫描实验曲线表明,ZN-33 材料损耗因子在 46 左右出现峰值,材料在此实验条件下处于黏弹态区;

(4)在材料受较大应力时,可用线性黏弹性模型去表征其蠕变行为;而在较小应力时,须用非线性的黏弹性本构模型去描述其蠕变行为的非线性;

(5)对呈现非线性蠕变特性的 ZN-33 材料进行时间—应力等效分析,得到该材料在某一参考应力下的等效蠕变柔量主曲线,这对研究黏弹性材料的力学行为、寿命预估都具有重要意义和应用价值。

#### 参考文献

- 戴德沛. 阻尼技术的工程应用. 北京:清华大学出版社,1991:50~65
- Christensen R M. Theory of viscoelasticity. New York: Academic Press, 1982: 3~20

3 孙庆鸿,张启军,姚慧珠. 振动与噪声的阻尼控制. 北京:机械工业出版社,1997:58~83

4 杨挺青,罗文波,徐平等. 黏弹性理论与应用. 北京:科学出版社,2004:1~11

5 Zhang R H, Song T T. Seismic design of viscoelastic dampers for structural applications. Journal of Structural Engineering, 1992; 118 (11): 1375~1392

6 杨挺青. 材料与结构蠕变研究近况. 力学进展, 2003; 30 (3): 476~478

7 Ginic-Markovic M, Dutta N K, Dimopoulos M. Viscoelastic behaviour of filled, and unfilled, EPDM elastomer. Thermochimica Acta, 2000; 357~358: 211~216

8 Vuoristo T, Kuokkala V T. Creep, recovery and high strain rate response of soft roll cover materials. Mechanics of Materials, 2002; 34: 493~504

9 Gabrel J O sanaiye, Kolapo P A newal. Creep and recovery of EPDM elastomer using a modified sandwich rheometer. Polymer Testing, 2001; 20: 363~370

10 罗文波,杨挺青,王霞瑜. 高聚物自由体积与温度和应力水平的相关性. 高分子材料科学与工程, 2005; 21 (3): 11~15

11 罗文波,杨挺青,安群力. 非线性黏弹体的时间—温度—应力等效原理及其应用. 固体力学学报, 2001; 22 (3): 119~224

12 O'Connell P A, McKenna G B. Large deformation response of polycarbonate: time-temperature, time-aging time and time-strain superposition. Polymer Engineering and Science, 1997; 37 (9): 1485~1495

(编辑 任涛)