

文章编号:1006-2467(2019)09-1017-06

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.09.001

环氧基形状记忆聚合物超弹-黏弹性本构 及大应变率相关性

樊鹏玄¹, 陈务军¹, 胡建辉¹, 赵兵¹, 房光强², 曹争利², 彭福军²

(1. 上海交通大学 空间结构研究中心, 上海 200240; 2. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201108)

摘 要: 为探讨环氧基形状记忆聚合物(ESMP)在大应变状态下由材料超弹-黏弹性引起的应力软化-刚化效应及率相关特性, 针对玻璃化转变温度(T_g)附近 ESMP 在发生大变形时表现出的应力软化和刚化效应进行力学本构方程及其试验研究. 利用 2 阶多项式的超弹性本构方程替换广义 Maxwell 模型中的线弹性胡克定律以考虑大应变条件下材料的刚化效应, 构造出超弹-黏弹性本构方程, 并在真应变速率恒定的条件下推导出具有解析表达式、便于工程应用的材料参数测定公式; 采用分段线性位移曲线逼近指数变化位移曲线, 在温度高于 T_g 点的橡胶态及低于 T_g 点 7 °C 的状态下, 分组进行不同应变率的 ESMP 单轴拉伸试验; 利用试验数据拟合得到推导本构方程的材料参数, 并对其相应的拉伸试验进行数值模拟, 试验结果与模拟结果较为吻合. 结果表明: ESMP 具备明显的率相关特性; 随着应变速率的增大, ESMP 的软化效应及刚化效应有所增强; 应变速率大的切线模量总是大于应变速率小的切线模量.

关键词: 环氧基形状记忆聚合物; 大应变; 超弹-黏弹性; 率相关; 刚化效应

中图分类号: O 345

文献标志码: A

Hyper-Viscoelastic Model and Rate-Dependence in Large Strain Regime of Epoxy Shape Memory Polymer

FAN Pengxuan¹, CHEN Wujun¹, HU Jianhui¹, ZHAO Bing¹

FANG Guangqiang², CAO Zhengli², PENG Fujun²

(1. Space Structures Research Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Aerospace System Engineering Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: In order to investigate the stress softening—stiffening effect and the rate—dependent properties caused by the hyper—viscoelasticity of epoxy shape memory polymer (ESMP) in large strain regime, this work makes attempt to reveal the softening and stiffening effect of ESMP near and above glass transition temperature (T_g). Firstly, to account the stiffening effect in large strain, a hyper-viscoelastic model is established by substituting the second-order polynomial hyper-elastic model to the linear Hooke's law in generalized Maxwell model. Meanwhile, the material constants calibration equations which are convenient for engineering application are derived for the case of constant true strain rate in analytical form. Then, the tensile tests in various strain rates are carried out at temperature above T_g in rubbery state and 7 °C below T_g , where the exponential tensile displacement curve are approached by finite pieces of linear

收稿日期: 2018-04-23

基金项目: 航天先进技术联合研究中心技术创新项目(USCAST2015-24, USCAST2016-21)

作者简介: 樊鹏玄(1996-), 男, 贵州省六盘水市人, 博士生, 主要从事智能材料与结构研究.

通信作者: 陈务军, 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 021-62932191; E-mail: cwj@sjtu.edu.cn.

displacement curve. The material constants are calibrated by the tests respectively. The numerical simulation of each test is carried out using the corresponding parameters, where the simulation results are found to have high consistency with the test results. The results indicate that ESMP behaviors significant rate-dependence. Meanwhile, the softening effect and the stiffening effect increase with increasing strain rate; the tangential modulus in a large strain rate is always greater than the tangential modulus in a small strain rate.

Key words: epoxy shape memory polymer (ESMP); large strain; hyper-viscoelasticity; rate-dependence; stiffening effect

形状记忆聚合物(SMP)属于新型智能软体材料,具有保持临时构型、当温度升至转变点以上又可恢复到原始构型的能力.同时,SMP的模量可随着温度的变化而大幅变化^[1-2].与传统的形状记忆合金、形状记忆陶瓷等材料相比,SMP具有能发生大应变、生物相容性好、制造成本低、可设计性强等优势,在空间可展开结构、变形结构、仿生结构、生物医疗器械等领域有着极为广泛的应用前景^[3].近年来国内外研发了多种SMP,其中环氧基形状记忆聚合物(ESMP)因具有较高的形状记忆固定率、恢复率以及良好的热稳定性和加工性等特性而受到广泛关注. McClung等^[4]研究了加载速率对ESMP松弛特性和形状恢复能力的影响. Wang等^[5]研究了经过碳化硅晶须增强后的ESMP形状记忆性能. Santiago等^[6]研究了超支化ESMP形状记忆性能提升的方法. 杜明昊^[7]研究了ESMP松弛时间与温度之间的关系. 谭巧^[8]研究了ESMP空间抗辐射性能,并基于相变理论建立了热力学本构方程. Zheng等^[1]在环氧树脂基体中添加聚双氯甲醚固化剂研制出可恢复应变高达180%的ESMP,而Fan等^[9]对该种ESMP的拉伸力学性能进行了试验研究.

目前,对于ESMP的研究多集中于制备材料方面,在材料热力学本构模型方面则仍沿用已有的经典本构模型,包括:Bhattacharyya等^[10]提出的基于线性黏弹性力学的4单元模型;Diani和Chen等^[11-12]提出的线弹性两相模型.此外,Gu等^[13]提出以热诱导形状记忆聚合物的三维有限变形力学为本构方程,并编写了数值计算程序;Diani及Luo等^[14-15]采用线性黏弹性模型也建立了能描述形状记忆效应的本构方程.已有的热力学本构方程大多将ESMP视作线性黏弹性体或是线弹性体;对ESMP率相关性的研究则局限于小应变范畴.然而,ESMP属于无定形聚合物,其形状记忆效应的热转变是玻璃化转变^[8-9],在玻璃化转变温度附近及以上区域,ESMP具有大变形能力并表现出黏弹性特点.

鉴于以往针对ESMP的热力学研究中,较少考虑在大应变状态下由材料超弹-黏弹性引起的应力软化-刚化效应及率相关特性,本文就这几方面进行理论和试验研究.利用广义Maxwell模型和超弹性本构方程,在有限应变格式下进行推导,可得到ESMP的超弹-黏弹性本构方程,其形式随着超弹性本构方程的形式而改变.以多项式形式的超弹性本构方程为例,推导相应的超弹-黏弹性本构方程,该方程为率形式的遗传积分方程,针对由强非线性引起的参数测定困难问题,在应变速率(真应变)恒定的条件下推导形式简单、便于工程应用的参数测定公式.基于普通单轴试验机给出参数测定的试验方法:在程控方式下采用分段匀速拉伸位移曲线逼近指数位移曲线,进行大应变拉伸试验;利用各组试验数据标定单轴状态在不同速率下的本构方程参数;基于ESMP体积不可压缩性和各向同性假定,补充体积模量相关参数;最后,采用标定得到的材料参数对应变速率为0.01~0.05 s⁻¹的试验进行三维有限元数值模拟,以验证所推导方程的正确性.

1 超弹-黏弹性本构方程及参数标定

基于广义Maxwell模型,可将黏弹性本构方程写成如下遗传积分形式^[16]:

$$\sigma(\epsilon, t) = \int_0^t \left(1 - \sum_{i=1}^N p_i (1 - e^{-\frac{t-s}{\tau_i}})\right) \frac{d\sigma_0(s)}{ds} ds \quad (1)$$

式中: σ 为应力; ϵ 为应变; N 为广义Maxwell模型中“弹簧-黏壶”单元数; p_i 为第*i*项Prony常数; τ_i 为第*i*项松弛时间; $\sigma_0(s)$ 为弹性响应部分; t 为时间; s 为遗传积分中的积分变量时间.

超弹-黏弹性本构方程建立的本质是将式(1)中的线弹性响应 $\sigma_0(s)$ 替换为超弹性响应,以考察材料刚度随应变增大而增大的效应.选择适用应变范围大、能考虑大应变下材料刚化效应的多项式超弹性本构方程建立超弹-黏弹性本构方程^[17].由于单轴试验较为容易且被广泛应用,同时便于得出解析方

程,选择在单轴状态下进行材料参数的试验测定.多项式形式超弹性模型的应变能函数为^[16-17]

$$U = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M C_{mn} (\bar{I}_1 - 3)^m (\bar{I}_2 - 3)^n + \sum_{k=1}^M \frac{1}{D_k} (J_{el} - 1)^{2k} \quad (2)$$

$m + n \neq 0$
 $M = 1, 2, \dots, 6$

式中: C_{mn} 和 D_k 分别为与材料切变模量和体积模量相关的材料常数; \bar{I}_1 和 \bar{I}_2 为应变不变量; J_{el} 为弹性体积应变. 当 $M = 2$ 时,该超弹性模型能较好地描述聚合物拉伸及压缩时体现的材料刚化效应^[17-18]. ESMP 在 T_g 附近及以上温度时泊松比 ν 接近 0.5^[14],假定体积不可压缩并忽略热膨胀,则有体积应变 $J = J_{el} = 1$. 此时应变能函数可写为

$$U = C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + C_{01} (\bar{I}_2 - 3) + C_{20} (\bar{I}_1 - 3)^2 + C_{11} (\bar{I}_1 - 3) (\bar{I}_2 - 3) + C_{02} (\bar{I}_2 - 3)^2 \quad (3)$$

求出超弹性应力响应为

$$\sigma_0(\lambda) = \frac{\partial U}{\partial \lambda} = 2C_{10}(\lambda - \lambda^{-2}) + 2C_{01}(1 - \lambda^{-3}) + 4C_{20}(\lambda^3 - 3\lambda + 1 + 3\lambda^{-2} - 2\lambda^{-3}) + 6C_{11}(\lambda^2 - \lambda - 1 + \lambda^{-2} + \lambda^{-3} - \lambda^{-4}) + 4C_{02}(2\lambda - 3 - \lambda^{-2} + 3\lambda^{-3} - \lambda^{-5}) \quad (4)$$

式中: λ 为伸长率,其与应变的关系为

$$\lambda(t) = e^{\epsilon(t)} \quad (5)$$

将式(4)和(5)代入式(1)可以得到超弹-黏弹性本构方程:

$$\sigma(\epsilon, t) = \int_0^t \left[1 - \sum_{i=1}^N p_i \left(1 - e^{\frac{s-t}{\tau_i}} \right) \right] (S_1 e^{3\epsilon(s)} + S_2 e^{2\epsilon(s)} + S_3 e^{\epsilon(s)} + S_4 e^{-2\epsilon(s)} + S_5 e^{-3\epsilon(s)} + 2S_2 e^{-4\epsilon(s)} + S_6 e^{-5\epsilon(s)}) \dot{\epsilon}(s) ds \quad (6)$$

式中: $\dot{\epsilon}(s)$ 为应变速率;

$$\begin{aligned} S_1 &= 12C_{20}, \quad S_2 = 12C_{11}, \quad S_6 = 20C_{02} \\ S_4 &= 4(C_{10} - 6C_{20} - 3C_{11} + 2C_{02}) \\ S_5 &= 6(C_{01} + 4C_{20} - 3C_{11} - 6C_{02}) \\ S_3 &= 2(C_{10} - 6C_{20} - 3C_{11} + 4C_{02}) \end{aligned}$$

式(6)中有 2 类材料参数待确定:与时间相关(黏性)的 p_i, τ_i ;与应变相关(超弹性)的 C_{mn} . 通过控制 $\epsilon(t)$ 为已知量进行试验,利用式(6)对测出的 $\sigma(t)$ 时间序列进行拟合可得到材料参数. 当式(6)中的 $\dot{\epsilon}(s)$ 为常数时,得到形式简单、便于应用的参数拟合方程. 该情况为恒定应变速率的拉伸(或压

缩)试验,令 $\dot{\epsilon}(s) = R$,则 $\epsilon(s) = Rs$,代入式(6)后得到参数拟合方程:

$$\sigma(\epsilon, t) = \left(1 - \sum_{i=1}^N p_i \right) \sigma_0(t) + \sum_{i=1}^N p_i \tau_i R e^{-\frac{t}{\tau_i}} \times \left[\frac{S_1}{1 + 3R\tau_i} (e^{\frac{1+3R\tau_i}{\tau_i}t} - 1) + \frac{S_2}{1 + 2R\tau_i} (e^{\frac{1+2R\tau_i}{\tau_i}t} - 1) + \frac{S_4}{1 - 2R\tau_i} (e^{\frac{1-2R\tau_i}{\tau_i}t} - 1) + \frac{S_5}{1 - 3R\tau_i} (e^{\frac{1-3R\tau_i}{\tau_i}t} - 1) + \frac{2S_2}{1 - 4R\tau_i} (e^{\frac{1-4R\tau_i}{\tau_i}t} - 1) + \frac{S_6}{1 - 5R\tau_i} (e^{\frac{1-5R\tau_i}{\tau_i}t} - 1) + \frac{S_3}{1 + R\tau_i} (e^{\frac{1+R\tau_i}{\tau_i}t} - 1) \right] \quad (7)$$

2 ESMP 恒应变速率拉伸试验

采用由本课题组配置的与文献[9]中相同的 ESMP 进行试验,其 T_g 点为 47.3℃,试件尺寸选用 80 mm×20 mm×2.5 mm,两端夹持长度为 20 mm,试件拉伸初始标距为 40 mm,如图 1 所示. 当温度 $\theta > T_g$ 时,材料处于橡胶态,具有良好的变形性能,故选取 $\theta = 55^\circ\text{C}$ 进行大应变下材料应力应变响应特点的研究. 同时,当 $\theta < T_g$ 但在 T_g 附近时,材料亦呈现出良好的变形性,因此选取 $\theta = 40^\circ\text{C}$ 进行进一步的研究. 试验中控制拉伸总应变为 1,对应的伸长率为 272%,取 R 分别等于 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 s⁻¹.

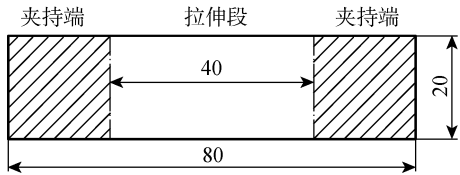


图 1 ESMP 矩形拉伸试件(mm)

Fig. 1 Rectangle specimen of ESMP (mm)

利用式(7)拟合材料参数时须采用真应变速率恒定的拉伸或压缩试验,即

$$\epsilon(t) = \ln(L/L_0) = Rt \quad (8)$$

式中: L_0 为初始拉伸标距; L 为 t 时刻试件长度. 此时拉伸位移曲线呈指数变化:

$$\Delta L = L - L_0 = L_0 (e^{Rt} - 1) \quad (9)$$

然而,普通的单轴试验机只能实现恒定拉伸速度的拉伸试验,故通过编写控制程序,将指数变化的拉伸位移分为 25 段匀速拉伸,试验施加的拉伸位移如图 2 所示,其中理想曲线是真应变速率为恒定值的指数变化曲线.

试验步骤:① 测量试件初始拉伸标距(夹具间距离)、宽和厚;② 编写试验机控制程序(采用深圳

三思 UTM4000 型万能试验机),将图 2 所示的指数位移曲线分为 25 段线性拉伸;③ 安装试件,设置温控箱温度为 40 ℃,等待 30 min 直至温控箱内热力场平衡,然后启动设备拉伸试件;④ 改变拉伸应变速率,重复步骤①~③;⑤ 将试验温度设置为 55 ℃,重复上述试验步骤,可得到在 55 ℃ 条件下材料的恒应变速率拉伸响应. 各组试件的试验数据如表 1 所示,其中 A_0 为初始截面积.

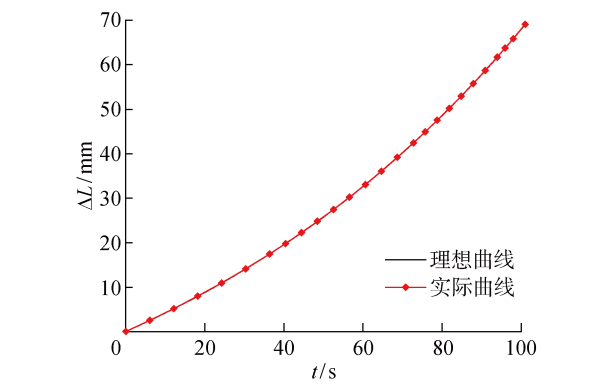


图 2 拉伸位移曲线
Fig. 2 Tensile displacement curves

表 1 各组试件试验数据
Tab. 1 Experiment data of each group

$\theta/^\circ\text{C}$	L_0/mm	A_0/mm^2	$\Delta L/\text{mm}$	R/s^{-1}
40	40.12	50.578	68.79	0.01
	39.89	55.05	68.76	0.02
	40.17	53.65	68.77	0.03
	40.15	56.45	68.85	0.04
	39.87	48.95	68.82	0.05
55	39.97	50.15	68.77	0.01
	40.43	48.95	68.74	0.02
	40.38	53.12	68.89	0.03
	40.07	48.16	68.96	0.04
	39.92	53.36	68.92	0.05

采用对数应变度量 ϵ , Cauchy 应力度量应力 σ , 则 σ 的计算公式为^[18]

$$\sigma(t) = J^{-1} \frac{FL}{A_0 L_0} \tag{10}$$

式中: F 为试验机的拉伸力读数.

拟合不同温度及不同速率下的试验数据,可以得到 40 及 55 ℃ 下不同速率的材料本构方程参数. 以 $\theta=40\text{ }^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$ 时的数据为例,试验得到的 σ - t 曲线及利用式(7)拟合得到的曲线如图 3 所示,得到的 ESMP 超弹-黏弹性本构方程中的材料参数如表 2 所示.

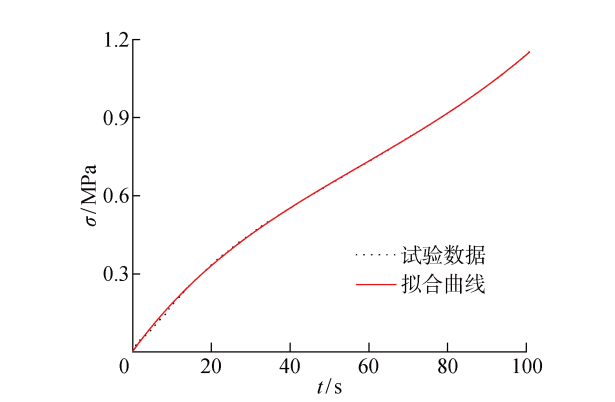


图 3 试验与拟合的应力-时间曲线
Fig. 3 Experimental and fitting curves of stress-time

表 2 ESMP 超弹-黏弹性本构方程中的材料参数
Tab. 2 Material parameters of ESMP in hyper-viscoelastic constitute model

参数	取值	
	$\theta=40\text{ }^\circ\text{C}$	$\theta=55\text{ }^\circ\text{C}$
C_{10}/MPa	0.110	0.195
C_{01}/MPa	0.296	0.340
C_{20}/MPa	0.001	0.004
C_{02}/MPa	0.001	0.001
C_{11}/MPa	0.009	0.003
p_1	0.152	0.310
p_2	0.084	0.133
τ_1/s	0.151	0.289
τ_2/s	52.060	12.930

3 三维状态材料常数及本构方程验证

进行三维状态力学分析时还需补充多项式超弹性模型中的材料常数 D_k . 已知多项式超弹性模型中的 C_{mn} 及 D_k 与初始切变模量 G_0 及体积模量 K_0 的关系^[18-19] 为

$$G_0 = 2(C_{10} + C_{01}) \tag{11}$$

$$K_0 = \frac{2}{D_1} \tag{12}$$

$$D_1 = \frac{3(1-2\nu)}{2(C_{10} + C_{01})(1+\nu)} \tag{13}$$

文献[14]在 θ 处于 T_g 附近及以上区域时取 ESMP 的 $\nu=0.499$,代入式(13)计算得到 D_1 为接近 0 的小量,代表 ESMP 具有体积不可压缩性. 同时,ESMP 属于各向同性体,故 D_2 可取为 0 或接近 0 的小量. 至此,ESMP 的超弹-黏弹性三维本构方程的材料参数全部确定,可利用 Abaqus 平台提供的黏弹性本构方程及超弹性本构方程建立有限元模

型,进而对各组试验进行模拟.在该平台建立本构方程,定义材料属性时需将超弹性模型及黏弹性参数分开输入;超弹性选择 2 阶多项式模型,输入材料常数 C_{mn} ;黏弹性选择时间域的 Prony 级数模型,输入 p_i 和 τ_i .根据试件尺寸建立有限元模型,采用 1 mm 边长的 C3D8H 正方体单元划分,以解决体积不可压缩性引发的刚度矩阵奇异问题.设置拉伸荷载步,拉伸时间与试验采用的时间相同,考虑到本构方程具有强非线性,设置初始增量步为 0.000 1 s.采用自动增量步类型,设置黏性计算容差为 10^{-5} .计算中采用混合单元技术解决不可压缩性问题,故该本构方程的收敛性尚可,以 $\theta=40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$ 时的情况为例,计算结束时增量步数为 523,各增量步中最大迭代次数为 10,求解过程耗时 116 s.不同温度下由数值模拟以及试验得到的应力-应变曲线如图 4 所示.

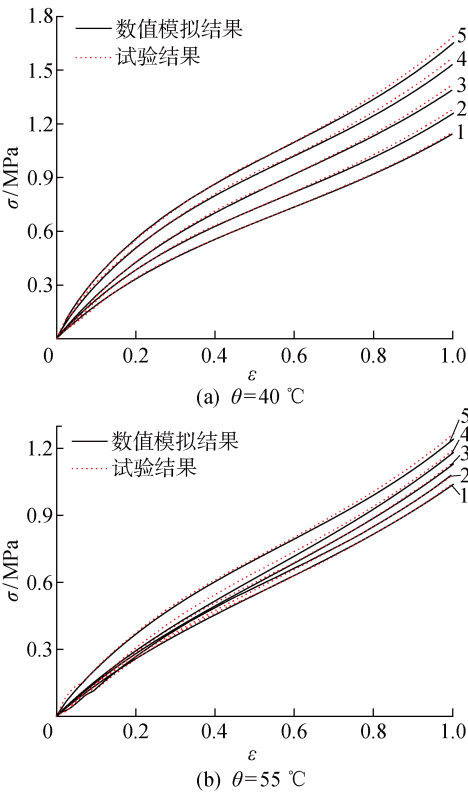


图 4 2 种温度下的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves under two temperature situations

对比 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下应力在最大值处 ($\epsilon=1.0$) 的计算结果 σ_{sim} 与试验结果 σ_{exp} 的相对误差 E_r (见表 3),其中 $E_r=(\sigma_{\text{sim}}-\sigma_{\text{exp}})/\sigma_{\text{exp}}$.总体来说计算结果与试验结果有较高的一致性,证明所推导的本构方程

是合理的.由图 4 可知,随着应变速率的增大,ESMP 的应力值更大. $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下试验所得应力-应变曲线的切线模量 E_t 如图 5 所示.由图 5 可知,与普通材料的黏弹性响应不同,在试验施加的应变水平下,ESMP 的应力-应变曲线斜率不仅有软化段还有刚化段,且应变速率越大,软化效应及刚化效应越明显.此外,应变速率大的应力-应变曲线斜率总是大于应变速率小的应力-应变曲线斜率,即应变速率越大,材料的切线模量越大. $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 试验下的应力-应变曲线斜率表现出相同规律,故此处不再赘述.

表 3 计算结果与试验结果的相对误差 ($\theta=40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Tab. 3 Relative error between numerical and experimental results ($\theta=40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	$E_r/\%$
0.01	0.77
0.02	1.92
0.03	1.99
0.04	2.21
0.05	2.26

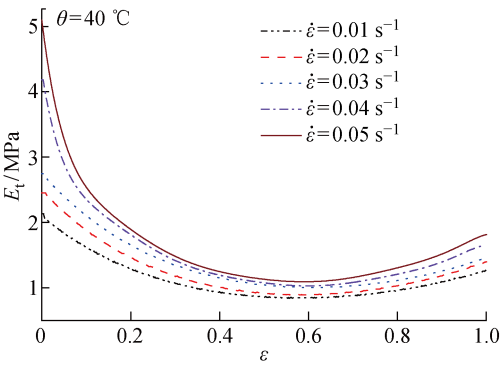


图 5 应力-应变曲线的切线模量

Fig. 5 Tangent modulus of the stress-strain curves

4 结语

结合 2 阶多项式形式的超弹性本构方程和经典的广义 Maxwell 方程进行推导,构造能考虑材料软化及刚化效应的超弹-黏弹性本构方程,在应变速率恒定的条件下推导了该本构方程的参数测定方程;在 $\theta>T_g$ 的橡胶态及 $\theta<T_g$ 但在 T_g 附近的状态进行不同应变速率的拉伸试验;利用各组试验数据拟合得到材料的超弹-黏弹性参数,并将参数分别代入本构方程中对试验进行数值模拟.计算结果与试验结果对比表明,所推导的本构方程可以有效地描述温度在 T_g 附近及以上区域,ESMP 发生大变形时材料的软化效应和刚化效应.此外试验结果还表明,

随着应变速率的增大,材料应力-应变曲线的斜率越大,材料的软化效应和刚化效应均有所增强。

参考文献:

- [1] ZHENG N, FANG G Q, CAO Z L, *et al.* High strain epoxy shape memory polymer[J]. **Polymer Chemistry**, 2015, 6(16): 3046-3053.
- [2] 吕海宝, 冷劲松, 杜善义. 形状记忆聚合物力学行为及其物理机制[J]. **固体力学学报**, 2017, 38(1): 1-12.
LÜ Haibao, LENG Jinsong, DU Shanyi. Working mechanism for the mechanical behavior of shape memory polymer[J]. **Chinese Journal of Solid Mechanics**, 2017, 38(1): 1-12.
- [3] JI S Z, WANG J, OLAH A, *et al.* Triple-shape-memory polymer films created by forced-assembly multilayer coextrusion[J]. **Journal of Applied Polymer Science**, 2017, 134(5): 44405
- [4] MCCLUNG A J W, TANDON G P, BAUR J W. Effects of loading rate on the relaxation and recovery ability of an epoxy-based shape memory polymer[J]. **Fluids**, 2017, 2(2): 13.
- [5] WANG Y K, TIAN W C, LIU X H, *et al.* Thermal sensitive shape memory behavior of epoxy composites reinforced with silicon carbide whiskers[J]. **Applied Sciences**, 2017, 7(1): 108.
- [6] SANTIAGO D, SANJUAN-FABREGAT A, FERRANDO F, *et al.* Improving of mechanical and shape-memory properties in hyperbranched epoxy shape-memory polymers[J]. **Shape Memory and Superelasticity**, 2016, 2(3): 239-246.
- [7] 杜明昊. 形状记忆环氧树脂回复速率及其温度影响效应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
DU Minghao. Investigation of temperature on the recovery rate of shape memory epoxy resin[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [8] 谭巧. 形状记忆环氧聚合物及其复合材料的典型力学行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
TAN Qiao. Typical mechanical behavior of epoxy shape memory polymer and its composite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [9] FAN P X, CHEN W J, ZHAO B, *et al.* Formulation and numerical implementation of tensile shape memory process of shape memory polymers[J]. **Polymer**, 2018, 148: 370-381.
- [10] BHATTACHARYYA A, TOBUSHI H. Analysis of the isothermal mechanical response of a shape memory polymer rheological model[J]. **Polymer Engineering & Science**, 2000, 40(12): 2498-2510.
- [11] DIANI J, LIU Y P, GALL K. Finite strain 3D thermoviscoelastic constitutive model for shape memory polymers[J]. **Polymer Engineering & Science**, 2006, 46(4): 486-492.
- [12] CHEN Y C, LAGOUDAS D C. A constitutive theory for shape memory polymers. Part II. A linearized model for small deformations[J]. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 2008, 56(5): 1766-1778.
- [13] GU J P, SUN H Y, FANG C Q. A finite deformation constitutive model for thermally activated amorphous shape memory polymers[J]. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 2015, 26(12): 1530-1538.
- [14] DIANI J, GILORMINI P, FRÉDY C, *et al.* Predicting thermal shape memory of crosslinked polymer networks from linear viscoelasticity[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2012, 49(5): 793-799.
- [15] LUO L, WANG X X, JIA Y X, *et al.* Recovery performance and characteristics in shape memory effects of aliphatic polyether urethane[J]. **Polymers for Advanced Technologies**, 2013, 24(7): 679-684.
- [16] GOH S M, CHARALAMBIDES M N, WILLIAMS J G. Determination of the constitutive constants of non-linear viscoelastic materials[J]. **Mechanics of Time-Dependent Materials**, 2004, 8(3): 255-268.
- [17] 黄辉祥, 汤文成, 吴斌, 等. 基于超弹性模型的牙周膜力学行为数值模拟[J]. **上海交通大学学报**, 2014, 48(9): 1263-1267.
HUANG Huixiang, TANG Wencheng, WU Bin, *et al.* Numerical simulation of mechanical behaviors of periodontal ligament based on hyperelastic model[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2014, 48(9): 1263-1267.
- [18] BELYTSCHKO T, LIU W K, MORAN B, *et al.* Nonlinear finite elements for continua and structures[M]. 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2013.
- [19] DASSAULT SYSTEM. Abaqus 6.13 documentation [EB/OL]. (2013-04-02)[2018-03-23]. <http://dsksippt.pan.pl/docs/abaqus/v6.13/index.html>

(本文编辑:石易文)