

文章编号: 1001-4888(2007)06-0612-05

## 变温下橡胶材料力学性能的实验分析\*

任九生, 黄 兴

(上海大学力学系, 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200444)

**摘要:** 利用 Zwick020 材料试验机研究了天然橡胶材料在不同温度条件下单向拉伸的大变形力学行为。得到了不同温度和不同加载速率条件下材料的应力—应变关系曲线和材料的破坏条件, 由此分析了高温和低温的温度变化条件及加载速率对材料力学性能的影响, 得出天然橡胶材料在大变形条件下的温度和加载速率敏感特性。同时利用实验结果拟合出材料的应变能函数, 并应用热超弹性模型对材料进行了理论分析。结果表明, 理论分析结果与实验结果仅在一定温度范围内吻合得较好, 因为材料软化或硬化, 在很高或很低的温度情况下二者有一定差别。

**关键词:** 天然橡胶材料; 单向拉伸大变形; 热超弹性模型; 变温; 加载速率

**中图分类号:** O343

**文献标识码:** A

### 0 引言

因橡胶材料具有大变形和高弹性的特点, 近年来在国民经济各个领域, 特别是在航空航天等高科技领域的应用日益广泛, 在材料领域中的地位也越来越重要, 因此对橡胶材料等高分子材料特性的研究已成为材料科学的前沿性课题<sup>[1~3]</sup>。橡胶材料的材料特性和几何特性都是非线性的, 其应力应变关系完全由它们的应变能函数给出, 这就是超弹性理论<sup>[4~5]</sup>。同时橡胶材料的物理性质和力学性质对温度的影响比较敏感, Nicholson 和 Nelson<sup>[6]</sup>, Miehe<sup>[7]</sup>等提出考虑温度影响的“热超弹性材料”模型, 并用有限元方法分析了温度对材料中应力—应变关系的影响。“挑战者号”航天飞机因 O 型密封圈的缘故造成的失败, 轮胎中大量存在的热破坏现象及耐高温橡胶制品的开发要求, 表明对热超弹性材料的研究和研究热环境等非弹性因素对橡胶材料的影响的理论是必要的。

本文的目的是分析橡胶材料在大跨度变温条件下的单向拉伸大变形力学行为, 讨论温度和加载速率对橡胶材料的应力—应变关系和材料的破坏条件等力学性能的影响。利用带温箱的 Zwick020 材料试验机, 得到了一类天然橡胶材料在不同温度和不同加载速率条件下的应力—应变关系曲线和破坏条件, 从而分析了天然橡胶材料在大变形条件下的温度和加载速率敏感特性。同时利用实验所得应力—应变关系曲线拟合了材料的应变能函数, 并应用一种热超弹性模型对材料的温度反映进行了理论分析。

### 1 试验

#### 1.1 试验装置

本文单向拉伸试验利用的是带温箱的 Zwick020 材料试验机, 最大载荷 2 吨, 应用电阻加热温箱内的最大温度可达 250℃, 应用液氮致冷温箱内的最低温度可达 -70℃, 加载速率范围为 0.0005mm/min ~ 1000mm/min。试验加载过程由载荷控制, 试验过程中如载荷为零, 试验机会自己终止试验。整个试

\* 收稿日期: 2007-01-31; 修订日期: 2007-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10402018, 10772104); 上海市教委青年基金资助项目(04AC90)

通讯作者: 任九生(1970-), 男, 博士, 副教授, 主要从事材料和结构的稳定性研究。

验操作过程根据 GB/T 258—1998<sup>[8]</sup>进行,外加载荷和试件变形由试验机自行测量并记录,最后通过应力—伸长率关系曲线表示出来。试验机温箱的升温速率约为 7.6°C/min,降温速率约为 4.0°C/min。

### 1.2 试件

本文橡胶材料为一类通用天然橡胶材料板,厚度为 2mm。所用试件根据 GB/T 258—1998 为标准哑铃状试件,试验段长 25mm,宽 6mm。

### 1.3 试验结果及分析

对于处于单向拉伸状态的不可压橡胶材料而言,其主伸长分别为

$$\lambda_1 = \lambda = \frac{L}{L_0}, \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中, $\lambda$ 为试件在拉伸方向的主伸长; $L_0$ 和  $L$ 分别为试件测量段的初始长度和最终长度。材料的主应力分别为

$$\sigma_1 = \sigma = \frac{T}{A_0}, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (2)$$

其中, $T$ 为所施加的载荷; $A_0$ 为试件测量段的初始横截面面积。

这里,我们分别在 $-40^\circ\text{C}$ , $-10^\circ\text{C}$ , $20^\circ\text{C}$ , $50^\circ\text{C}$ , $80^\circ\text{C}$ , $110^\circ\text{C}$ , $140^\circ\text{C}$ , $170^\circ\text{C}$ 等温度下,对加载速率分别为 20 mm/min,100 mm/min,300 mm/min,500 mm/min 的情况进行了试验。同一温度、不同速率情况下的应力—伸长率关系曲线分别如图 1(a~h)所示;不同速率、不同温度情况下的破坏应力和扯断伸长率分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 不同速率、不同温度下的破坏应力(MPa)

Tab.1 Failure stresses (MPa) at different temperatures and load rates

温度(°C)	100 (mm/min)	300 (mm/min)	500 (mm/min)
-40	9.75	11.50	12.333
-10	4.942	5.008	5.30
20	2.783	3.108	3.275
50	2.967	2.125	2.292
80	1.308	1.717	2.025
110	1.042	1.192	1.317
140	0.875	0.983	1.192
170	0.715	0.850	0.933

表 2 不同速率、不同温度下的扯断伸长率(%)

Tab.2 Failure stretches (%) at different temperatures and load rates

温度(°C)	100 (mm/min)	300 (mm/min)	500 (mm/min)
-40	89	54.3	51
-10	423	424	433
20	442	433	436
50	324	338	362
80	258	343	356
110	269	298	302
140	227	232	298
170	205	206	214

可见,在同一温度条件下,随着加载速率的增加,材料的强度得到增强,同时材料破坏时的破坏应力增大;材料破坏时的扯断伸长率在温度升高的条件下均随加载速率的增加而增大,但在 $-40^\circ\text{C}$ 时的低温时,却随加载速率的增加而减小。在同一加载速率条件下,随着温度的增加,材料的强度减弱,同时材料破坏时的破坏应力减小,材料的屈服加快,材料的破坏变易;材料破坏时的扯断伸长率在温度升高的条件下随温度的增加而减小,且应力—伸长率曲线上的“平台”段逐渐缩短;另外材料的扯断伸长率在温度降低的条件下随温度的降低而减小,应力—伸长率曲线上的“平台”段也逐渐缩短。

总而言之,天然橡胶材料对温度和加载速率均非常敏感,其力学性能强烈地依赖于温度和加载速率;特别是对低温反映更为敏感,在 $-40^\circ\text{C}$ 时的低温条件下,材料的应力—伸长率曲线明显不同,材料破坏时的破坏应力和扯断伸长率也有显著的差别。另外,在高温条件下,随着温度的增加,材料对加载速率更为敏感一些。

根据高分子材料的基本理论<sup>[9]</sup>,天然橡胶等高分子材料随着温度由低到高的增加,具有玻璃态或结晶态、橡胶态和粘流态的不同形态。天然橡胶的玻璃化温度虽然约为 $-75^\circ\text{C}$ ,但它可以在远高于该温度

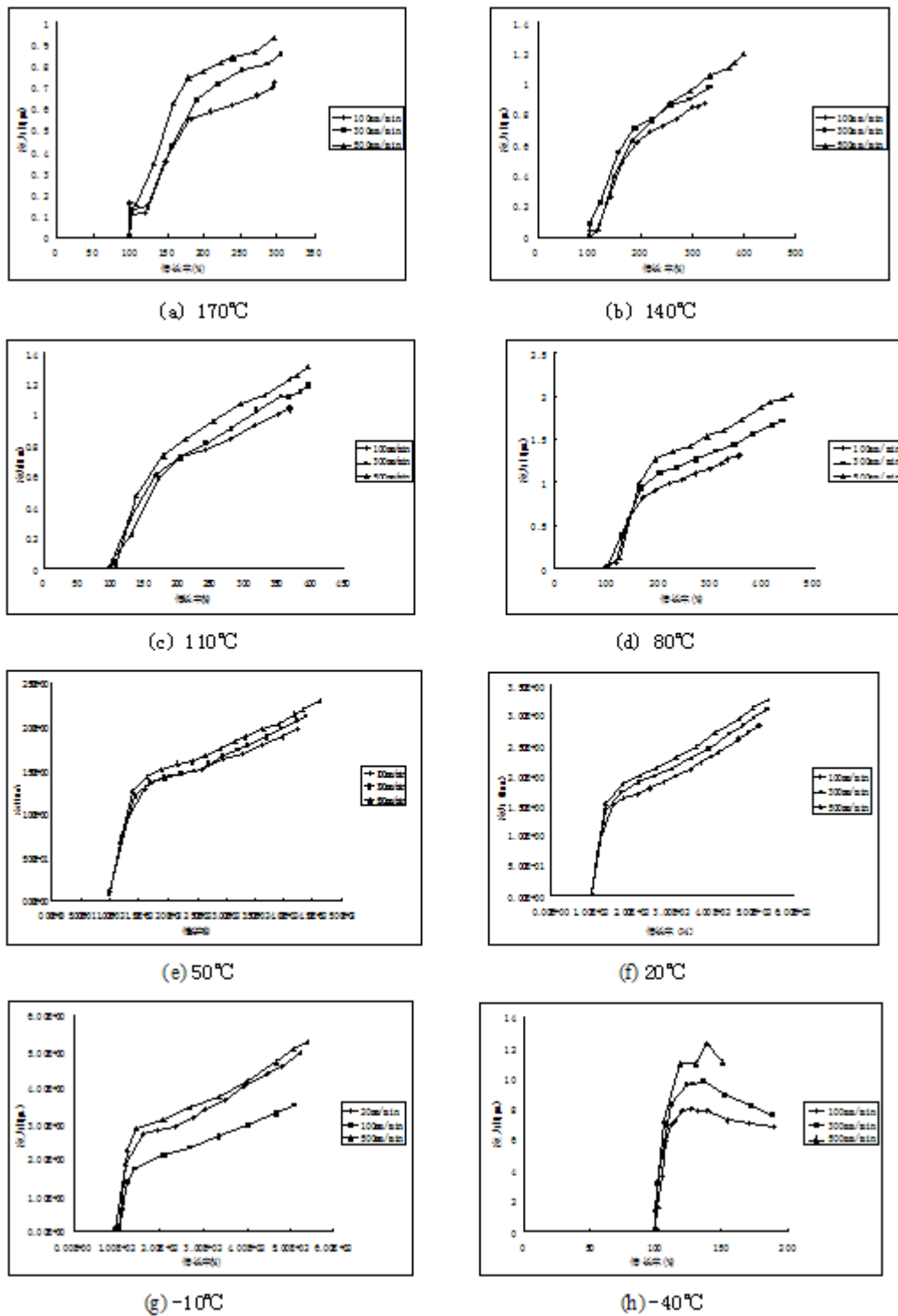


图1 不同温度时应力—伸长率曲线

Fig. 1 Stress-stretch curves at different temperatures

的条件下结晶,其结晶速度在 $-25^{\circ}\text{C}$ 时达到最大,结晶和玻璃化转变一样可以使橡胶变硬,因此,天然橡胶材料在温度低于室温时会有不同程度的硬化,其硬度会有不同程度的增加。另一方面,天然橡胶材料受热软化,在 $130^{\circ}\text{C}\sim 140^{\circ}\text{C}$ 开始流动,在 $200^{\circ}\text{C}$ 左右开始分解,因此,天然橡胶材料在温度高于其开始流动温度时会有不同程度的软化,在 $140^{\circ}\text{C}$ 和 $170^{\circ}\text{C}$ 时的应力—伸长率曲线图上可明显地看到这个软化现象。正因为如此,天然橡胶材料对温度如此敏感。另外,天然橡胶材料网状的高分子链结构的充分伸展

应该需要时间,随加载速率的减小,天然橡胶材料网状的高分子链结构能够得以充分的伸展,因此,天然橡胶材料对加载速率也非常敏感。

## 2 超弹性模型理论分析

对不可压超弹性材料,其应力—应变关系可表示为<sup>[10]</sup>

$$\sigma = 2(\lambda - \lambda^{-2})(W_1 + \lambda^{-1}W_2) \quad (3)$$

其中,  $W = W(I_1, I_2)$  为材料的应变能函数;  $I_1, I_2$  分别为材料变形张量的第一和第二不变量;  $W_1, W_2$  表示应变能函数对第一和第二不变量的偏导数。

应用最小二乘法对常温下加载速率为 20mm/min 的应力—伸长率曲线进行拟合<sup>[11]</sup>,可得如下应变能函数

$$W = 0.71(I_1 - 3)^{0.77} \quad (4)$$

在单向拉伸状态时,  $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = \lambda^2 + 2\lambda^{-1}$ 。

对不可压热超弹性材料,应变能函数的一般形式可表示为<sup>[6]</sup>

$$\tilde{W}(I_1, I_2, T) = W(I_1, I_2) + \hat{W}(T) \quad (5)$$

其中,  $W(I_1, I_2)$  为通常等温情况下的应变能函数,  $W = \hat{W}(T)$  描述温度的影响,一般情况下可写为<sup>[4]</sup>

$$\hat{W}(T) = C_3 T \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_4 (T - T_0)(I_1 - 3) \quad (6)$$

其中,  $T = T(R)$  或  $T = T(r)$  为材料的温度场;  $C_3 = C_e$  和  $C_4 = -\alpha\mu$ ,  $C_e$  为材料的比热容常数;  $\alpha$  为材料的体积热膨胀系数;  $\mu$  为材料的第二拉梅常数;  $T_0 = 300\text{K}$  为参考温度<sup>[5]</sup>。

将  $W(I_1, I_2)$  取为我们拟合得到的应变能函数(4),  $W = \hat{W}(T)$  中的参数取为天然橡胶材料的相应常数<sup>[11]</sup>:  $C_e = 1506\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $\rho = 950\text{kgm}^{-3}$ ,  $\alpha = 6.7 \times 10^{-4}\text{K}^{-1}$ ,  $\mu = 1.94\text{MPa}$ 。则相应的应力分量为

$$\sigma = 2(\lambda - \lambda^{-2})[0.548(\lambda^2 + 2\lambda^{-1} - 3)^{-0.23} + C_4(T - T_0)] \quad (7)$$

由(7)得到的理论预测值与实验结果的对比示于图2。可见,理论预测与实验结果在  $20^\circ\text{C} \sim 130^\circ\text{C}$  温度范围内能够吻合得较好,温度很高和温度较低时两者有一定的差别。究其原因,天然橡胶材料在  $-10^\circ\text{C}$  时已经开始结晶,结晶使橡胶硬化,硬化橡胶材料和常温下的橡胶材料有截然不同的力学特征,并不能完全表现出弹性体的特征;另外,天然橡胶材料在  $130^\circ\text{C}$  时已经开始流动,使橡胶软化,软化橡胶材料和常温下的橡胶材料的力学特性也有截然不同的特征。因此橡胶材料的热超弹性模型在低于室温时或高于  $130^\circ\text{C}$  时,对硬化或软化橡胶材料的应用应该受到限制。

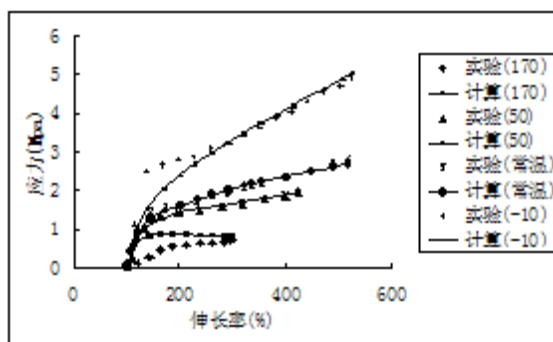


图2 100 mm/min时应力—伸长率曲线的理论预测与实验结果对比

Fig. 2 Comparison of the theoretical and experiment stress-stretch curves at 100 mm/min

## 3 结论

(1) 天然橡胶材料对温度的影响非常敏感,随着温度的增加,材料的强度减弱,同时材料破坏时的破坏应力减小,材料的屈服加快,材料的破坏变易;材料破坏时的扯断伸长率在温度升高的条件下随温度的增加而减小,在温度降低的条件下随温度的降低而减小。

(2) 天然橡胶材料对加载速率影响非常敏感,随着加载速率的增加,材料的强度得到增强,同时材料破坏时的破坏应力增大,材料破坏时的扯断伸长率在温度升高的条件下随加载速率的增加而增大,但在  $-40^\circ\text{C}$  时的低温时,却随加载速率的增加而减小。

(3) 天然橡胶材料在温度低于室温时开始结晶,使橡胶硬化;在 130℃ 时已经开始流动,使橡胶软化,硬化或软化橡胶材料和常温下的橡胶材料的力学特性有截然不同的特征。橡胶材料的热超弹性模型在低于室温时或高于 130℃ 时的应用应该受到限制。

#### 参考文献:

- [1] 国家自然科学基金委员会. 力学[M]. 北京:科学出版社,1997(National Nature Science Foundation Committee. Mechanics. Beijing: Science Press, 1997 (in Chinese))
- [2] 王作龄. 橡胶材料科学的发展[J]. 世界橡胶工业,1998,25:41~47 (Wang Zuoling. Development of the rubber material science. Rubber Engineering in the World, 1998, 25:41~47 (in Chinese))
- [3] 詹特 A N, 张立群等译. 橡胶工业[M]. 北京:化学工业出版社,2002(Gent A N. Engineering with Rubber. Munich: Carl Hanser Verlag, 2001)
- [4] 黄筑平. 连续介质力学基础[M]. 北京:高等教育出版社,2003 (Huang Zhuping. Fundamentals of Continuum Mechanics. Beijing: High Education Press, 2003 (in Chinese))
- [5] 爱林根 A C. 程昌钧,俞焕然译. 连续统力学[M]. 北京:科学出版社,1991(Eringen A C. Mechanics of Continua. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1967)
- [6] Nicholson D W, Nelson N. Finite element analysis of hyperelastic components[J]. Appl. Mech. Rev., 1998, 51: 303~319.
- [7] Miehe C. Entropic thermoelasticity at finite strains, Aspects of the formulation and numerical unplementation[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1995, 120: 243~269.
- [8] GB/T 258-1998. 硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定[S]. 中国国家标准总局, 北京, 1998 (GB/T 258-1998. Rubber Vulcanized-Determination of Tensile Properties. Total Bureau in Chinese National Standard, Beijing, 1998(in Chinese))
- [9] 过梅丽,赵得禄. 高分子物理[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005 (Guo Meili, Zhao Delu. Macromolecule Physics. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005(in Chinese))
- [10] Rivlin R S. The elasticity of rubber[J]. Rubber Chem. Technol, 1992, 65: G51~G65.
- [11] 刘登祥主编. 橡胶及橡胶制品[M]. 北京:化学工业出版社, 2005 (Liu Dengxiang. Rubber and Rubber Produces. Beijing: Chemical Engineering Press, 2005(in Chinese))

## Experimental Study of Natural Rubber Mechanical Property in Variable Temperature Fields

REN Jiu-sheng, HUANG-Xing

(Department of Mechanics, Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** Under a uniaxial tensile loading and in variable temperature fields, taking into account large-scale deformation, mechanical behavior of natural rubber was studied by using a Zwick020 material test machine. Both stress-strain relation curve and rupture condition of the rubber were attained under different temperatures and different loading rates. The effects of higher and lower temperature and the effects of different loading rate on mechanical properties of the material were analyzed. The sensitivity of natural rubber related to both temperature and loading rate in large-scale deformation was examined. At the same time, strain energy function for the material was developed from the experimental results and theoretical analyse was carried out based on thermo-hyperelastic model. It shows that theoretical results accord with experimental results only in certain temperature ranges due to the material softening or hardening under high or low temperatures.

**Keywords:** natural rubber; large-scale uniaxial tensile deformation; thermo-hyperelastic model; variable temperature fields; loading rates