

橡胶材料简单剪切试验分析

付新华¹, 姜晓凤¹, 房子钧¹, 王若云², 邓彩霞¹

(1. 三角轮胎股份有限公司, 山东 威海 264200; 2. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 研究动态剪切试验方式进行应变扫描测试, 表明温度是橡胶材料性能的关键因子; 相同材料多次测试结果对比说明测试过程中会出现Payne效应和Mullins效应, 并通过多次测试的方法消除Mullins效应的影响; 根据剪切模式受力方式推导了几种超弹性本构模型公式并与单轴拉伸数据拟合结果进行了对比。

关键词: 橡胶; 粘弹性; 简单剪切; 超弹性

中图分类号: TQ330.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8171(2016)10-0630-05

有限元分析在轮胎设计中的应用越来越广泛, 目前的轮胎分析不仅限于静态下的力学特性研究, 而且逐渐向动态下的力学特性分析发展, 这就需要更准确的仿真模型。轮胎性能几乎都是在滚动过程中体现出来的, 速度和负荷都会对其性能产生影响。由于橡胶材料的粘弹性, 轮胎在不同速度和负荷下滚动时会导致胶料温度变化, 而胶料的应力-应变关系会随温度改变。为了得到能更好表征胶料特性的超弹性参数, 本工作设计了动态热机械分析(DMA)剪切试验, 并对剪切模式下的超弹性模型进行推导。

1 实验

1.1 原理

剪切测试采用德国GABO公司的高力值动态粘弹谱仪。剪切试验的试样为厚度约2 mm的圆柱体, 一次测试需要2个, 用强力胶水将其牢牢粘合在3个金属圆柱体上, 放置一段时间之后再放入试验舱进行测试。

双剪切试验测试原理如图1所示, 其中 h 为胶料厚度, l 为试样直径, X 表示移动距离(剪切量), F 为动态力。试验数据通过以下公式计算:

$$|G^*| = G' + iG'' = \frac{\tau}{\gamma}$$

$$\tau = \frac{F}{2A} \text{ (双剪切)}$$

$$\gamma \approx \frac{X}{h}$$

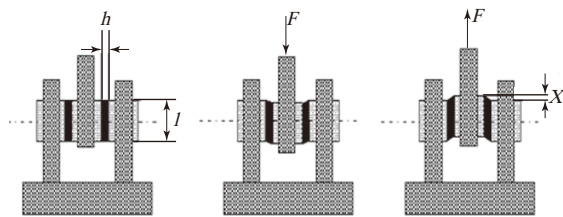


图1 双剪切试验原理示意

式中 G^* ——复合剪切模量;
 G' ——储能模量;
 G'' ——损耗模量;
 τ ——剪切应力;
 γ ——剪切应变;
 A ——试样初始截面积。

1.2 DMA剪切测试

选取K01, K02和K03三种胶料, 单轴拉伸和剪切测试试样均在同样的胶片上制取, 并尽量同时开始测试。

单轴拉伸: 在GOTECH设备按一定的速度进行重复拉伸至100%左右。

剪切测试: 固定频率为10 Hz、每种胶料分别做23和60 °C下的应变扫描测试。

得到不同应变幅值下对应的 τ 、 G' 、 G'' 、 G^* 和损耗因子($\tan\delta$), 重复操作6次以上, 然后用另一组试样做相同测试。

2 结果与讨论

2.1 设备重复性验证

首先以K01胶料为例分析2组试样在相同测试条件下(23 °C, 10 Hz)数据的吻合程度, 对比结果

作者简介: 付新华(1985—), 男, 山东莘县人, 三角轮胎股份有限公司工程师, 硕士, 主要从事轮胎性能仿真及材料性能研究工作。

如图2所示。

由图2可见,2组测试曲线基本重合,试验重复性良好,可以排除试样不同导致的数据差异。

2.2 温度影响

同样以K01为例分析23和60℃下(其他条件相同)应变扫描结果,对比结果如图3所示。

由图3可以看出:不同温度下 τ , G' 和 $\tan\delta$ 都有明显差异;随着温度的升高,胶料会相对“变软”, G' , G'' 和 $\tan\delta$ 均呈下降趋势。

由于材料的粘弹性,轮胎在实际滚动过程中温度会发生变化,而胶料特性也随温度改变,因此仿真分析,尤其是动态模拟时需要考虑随温度而变化的参数。

2.3 测试次数的影响

进行应变扫描的主要目的是拟合超弹性模型,而在Abaqus中定义超弹性时不考虑永久变形和滞后损失,基于这个原因应变扫描时每组试样进行了7次重复测试。分别对比了同组试样不同测试次数的曲线,结果如图4所示。

由图4可以看出:第1~7次测试均在小变形阶段($<5\%$) G' 急剧减小、 G'' 先增大后急剧减小;此外,无论是应力-应变曲线还是模量曲线都是第1次的曲线“最高”,接下来几次的结果均比第1次小, $\tan\delta$ 则是第1次最小;前两次结果相差最明显,第6次与第7次结果几乎重合。以上现象分别对应了胶料的Payne效应和Mullins效应。同样的现象在K02和K03胶料中也有体现。

通过上述分析,要得到去除Mullins效应的应力-应变曲线,每组试样要进行至少3次重复测试,选取最后一次的结果作为超弹性拟合的基准。

2.4 剪切与单轴拉伸对比

剪切试验应变扫描结果与单轴拉伸试验结果对比(分别取最后一次试验数据)如图5所示。

由于变形模式不同,两种模式下得到的应力-应变曲线趋势差异明显。下面以该数据为基准,结合各自的超弹性本构关系进行参数拟合,并对比同一本构模型下参数的差异。

2.5 剪切模式公式推导

简单剪切模式下试样的变形模式与单轴拉伸不同,在动态力的作用下其受力-变形方式如图6所示。在动态力 F 作用下, X 近似设为 γ ; σ_{11} 和 σ_{22} 为

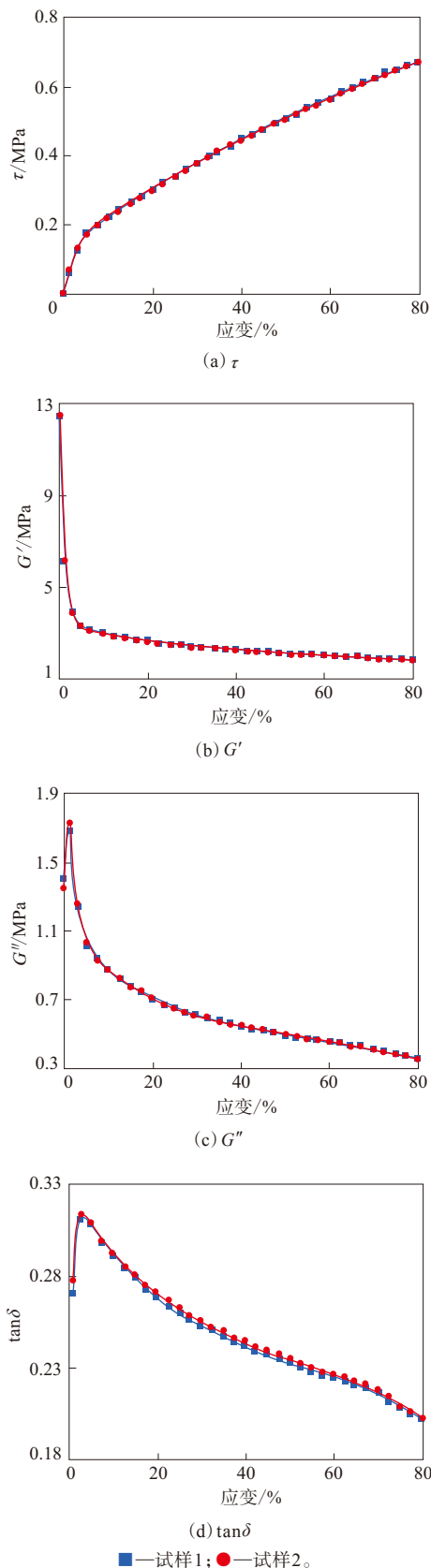


图2 不同试样各参数随应变的变化曲线

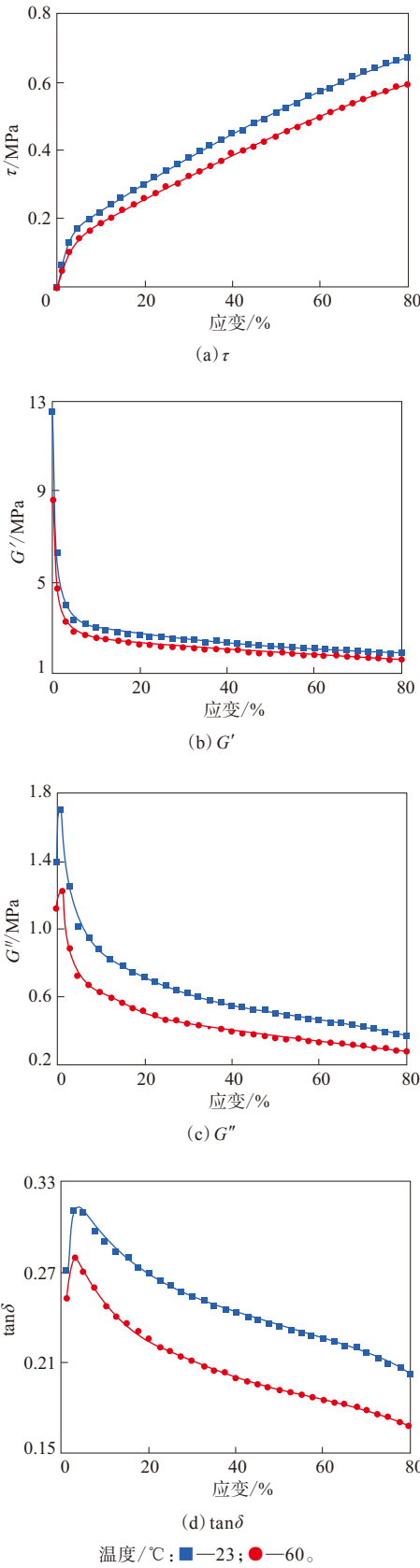


图3 不同温度下各参数随应变的变化曲线

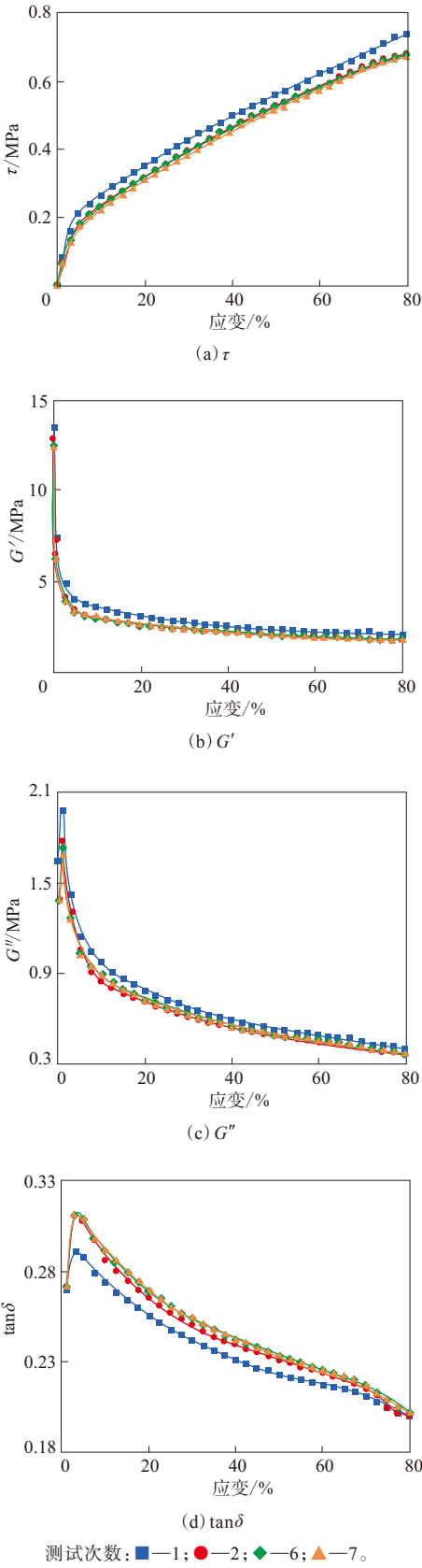


图4 不同测试次数各参数随应变的变化曲线

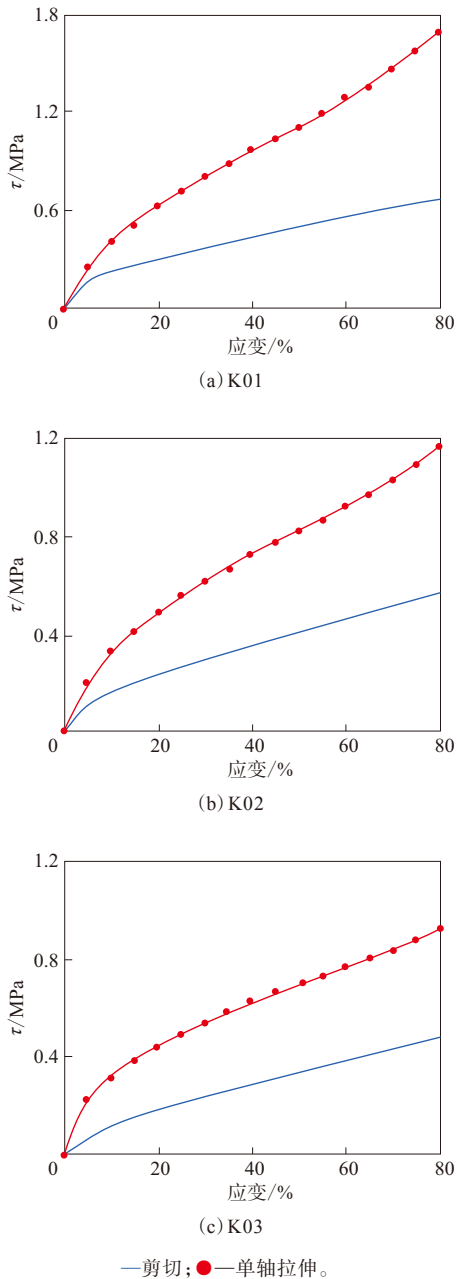


图5 不同胶料的应力-应变曲线

正应力, σ_{12} 为剪应力, 表达式为

$$\sigma_{12} = F/A = \tau \quad (\text{单剪切})$$

一般超弹性应变能密度方程可以用变形张量的3个不变量 I_1, I_2 和 I_3 表示, 即 $W(I_1, I_2, I_3)$; 也可以用3个主伸长率 λ_1, λ_2 和 λ_3 表示, 即 $W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, W 表示应变能密度。

变形张量与主伸长率之间的关系如下:

$$\lambda_1 = \lambda, \quad \lambda_2 = 1/\lambda, \quad \lambda_3 = 1$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \quad I_2 = 1/\lambda_1^2 + 1/\lambda_2^2 + 1/\lambda_3^2$$

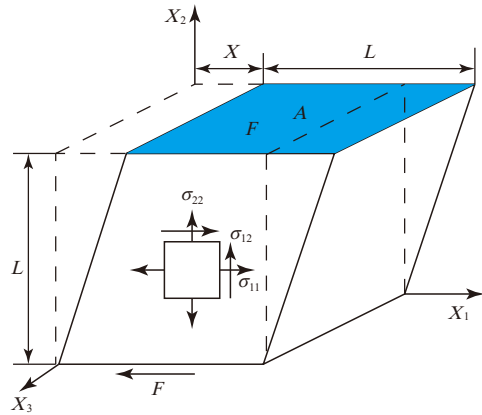


图6 剪切模式动态力作用下受力-变形方式

图6所示剪切模式下^[1]:

$$I_1 = I_2 = \lambda^2 + 1/\lambda^2 + 1 = \gamma^2 + 3, \quad \gamma = \lambda - 1/\lambda$$

推导得到单剪切模式下:

$$\tau = 2(dW/dI_1 + dW/dI_2)\gamma = |G^*| \gamma$$

由以上关系式可以根据常用的超弹性模型, 如Neo-Hookean模型^[2]:

$$W(I_1) = C_{10}(I_1 - 3)$$

得到剪切模式下的表达式:

$$\tau = 2C_{10}\gamma$$

同理可以推出剪切模式其他本构模型的表达式, Mooney-Rivlin:

$$\tau = 2(C_{10} + C_{01})\gamma$$

Yeoh:

$$\tau = 2(C_{10}\gamma + 2C_{20}\gamma^3 + 3C_{30}\gamma^5)$$

Ogden:

$$\tau = 2\mu_1 \frac{\lambda}{1 + \lambda^2} (\lambda^{\alpha_1} - \lambda^{-\alpha_1}), \quad \lambda = \frac{\gamma + \sqrt{\gamma^2 + 4}}{2}$$

Van der Waals:

$$\tau = \mu \left(\frac{\lambda_m^2 - 3}{\sqrt{\lambda_m^2 - 3} - \gamma} - \sqrt{\lambda_m^2 - 3} - \frac{\sqrt{2}\alpha}{2} \gamma^2 \right)$$

式中, C_{10}, C_{01}, C_{20} 和 C_{30} 为多项式系数, λ_m 为锁死应变, α 和 α_1 为材料常数。

2.6 超弹性参数拟合

将3种胶料的单轴拉伸和剪切数据 (23 °C) 按上述本构方程分别进行拟合。其中单轴拉伸数据在Abaqus软件中自动拟合, 剪切模式在Matlab中进行拟合求解, 单轴拉伸与剪切Neo-Hookean和Yeoh模型的对比情况如表1所示。由表1可见, 两种模式拟合得到的超弹性参数差别明显。目前常用拟合单轴拉伸数据得到的Yeoh模型来表征橡胶

表1 3种胶料参数对比				
项 目	Neo-Hookean	Yeoh		
	C_{10}	C_{10}	C_{20}	C_{30}
K01				
单轴拉伸	0.785 5	1.007 0	-0.789 3	0.511 2
剪切	0.812 5	0.978 5	-0.941 8	0.839 0
K02				
单轴拉伸	0.495 1	0.556 6	-0.330 4	0.222 1
剪切	0.662 8	0.808 0	-0.956 3	0.986 7
K03				
单轴拉伸	0.412 6	0.524 9	-0.392 4	0.265 4
剪切	0.514 4	0.572 5	-0.502 0	0.495 0

材料超弹性,显然用剪切模式得到的Yeoh参数进行仿真计算得到的结果不同。

3 结语

研究了橡胶材料剪切模式进行动态应变测

试的方法,并以3种胶料为例进行了测试分析,表明温度是橡胶材料性能的关键因子;通过相同材料多次测试,说明测试过程中会出现Payne效应和Mullins效应,可通过测试多次的方法消除Mullins效应的影响;根据剪切模式受力方式推导了几种超弹性本构模型公式,并与单轴拉伸数据拟合结果进行了对比。

参考文献:

[1] Moreira D C, Nunes L C S. Comparison of Simple and Pure Shear for an Incompressible Isotropic Hyperelastic Material under Large Deformation[J]. Polymer Testing, 2013, 32: 240-248.
[2] Moreira D C, Nunes L C S. Simple Shear under Large Deformation: Experimental and Theoretical Analyses[J]. European Journal of Mechanics A/Solids, 2013, 42: 315-322.

收稿日期:2016-04-19

Analysis of Rubber Material by Simple Shear Test

FU Xinhua¹, JIANG Xiaofeng¹, FANG Zijun¹, WANG Ruoyun², DENG Caixia¹

(1. Triangle Tire Co., Ltd, Weihai 264200, China; 2. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: In this paper, strain sweep test of rubber compound by using dynamic shearing was discussed, and the test result indicated that temperature was a key factor influencing the rubber material properties. The results of several tests of the same material showed Payne effect and Mullins effect. The influence of Mullins effect could be eliminated by multiple testing. Several hyperelastic constitutive model equations were derived based on shear force mode, and compared with the modeling results from uniaxial tension data.

Key words: rubber; viscoelastic behavior; simple shear; hyperelastic behavior

大陆推出新TerrainContact A/T轮胎

中图分类号:TQ336.1;F27 文献标志码:D

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntiredealer.com)2016年7月12日报道:

大陆轮胎美洲公司选择在美国宾夕法尼亚州法明顿推出其TerrainContact A/T轮胎(见图1)。该轻型载重轮胎专为拥有豪华越野性能的皮卡和SUV车型设计。

该轮胎的特点是开放、醒目的胎面花纹,花纹采用噪声阻断设计,将推出35个规格:轮辋直径最大至559 mm(22英寸)的20个公制规格及轮辋直径最大至508 mm(20英寸)的15个轻载(LT)规格。公制规格范围为265/75TR16到285/45HR22 XL。



图1 TerrainContact A/T轮胎

首个大陆品牌LT规格的范围为LT245/75R16 到LT285/60R20。所有规格产品均享有96 600 km(60 000英里)胎面磨损担保。

大陆公司称,该轮胎预计2016年秋季面市。

(吴秀兰摘译 赵敏校)