

# 填充橡胶本构模型研究进展

危银涛<sup>1\*</sup>, 方庆红<sup>2</sup>, 金状兵<sup>1</sup>, 冯希金<sup>1</sup>

(1. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084;

2. 沈阳化工大学, 材料科学与工程学院, 沈阳 110142)

**摘要:**填充橡胶材料是由纳米粒子增强的复合多相材料。由于橡胶交联网络和填充粒子所形成的二级网络并存, 填充橡胶呈现出复杂的力学行为, 如大变形黏超弹性、动态应力软化效应, 自生热效应等。如何构建合理的本构模型准确描述其力学行为一直是橡胶材料研究的热点和难点。而近年来数值仿真技术的发展对填充橡胶本构关系的可靠性, 准确性和数值稳定性提出了更高的要求。本文综合前人工作, 总结了填充橡胶超弹性、黏弹性、流变本构研究的进展。特别从本构关系与有限元分析相容性的角度, 分析了各常用模型的精度、使用范围和参数化性能, 为橡胶力学仿真提供指导, 并指出了目前橡胶本构模型研究中所存在的问题, 探讨了改进的方向。

**关键词:**填充橡胶; 本构模型; 流变; 黏弹性; 超弹性

## 引言

本构关系指物体在某一类物理量作用下产生的相关物理量随物质而异的关系。本构模型是理想化的物质本构行为的数学力学描述。本构律和平衡律、变形协调律一起构成了固体力学的三大基石<sup>[1]</sup>。本构理论也是非牛顿流体力学理论不可缺少的最重要的一部分<sup>[2]</sup>。填充橡胶广泛应用于轮胎、胶管、缓冲气囊、阻尼器、悬置等工程结构, 由于添加了填料形成二级网络, 填充橡胶的力学行为异常复杂。填充橡胶的熔体是非牛顿流体, 其流变行为与温度、剪切速率复杂相关。未硫化橡胶的力学性能还少有人研究过, 其试件制作和实验方法都未有形成标准<sup>[3]</sup>。获得未硫化橡胶的力学本构模型, 是轮胎成型工艺仿真、生胎在模具内的定型和膨胀变形仿真的基础。硫化橡胶由于交联形成永久网络而展现超弹性, 不可压缩性, 大变形能力, 同时由于复杂网络的破坏与重组而展现出复杂的黏弹性, 包括 Payne 效应和 Mullins 效应。其本构关系的表征、确定及数值实现、考虑不可压缩性的大变形有效数值方法都较为困难<sup>[4]</sup>。

在橡胶结构分析与设计中建立和发展适当的本构关系和分析方法是极其重要的。由于橡胶本构研究的重要性和复杂性, 工业界和学术界对橡胶本构的研究非常重视, 从 1999 年起, 每两年一度的欧洲橡胶本构模型会议(ECCMR)开始召开, 迄今已召开六届, 分别在维也纳、汉诺威、伦敦、斯德哥尔摩、巴黎和德累斯顿举行。本文对橡胶本构模型进行的综述, 以超弹性模型为主, 即硫化后橡胶的力学行为为主, 同时也对橡胶的黏弹性和流变行为略加顾及, 并指出橡胶本构模型研究的方向。

## 1 橡胶超弹性本构模型

对橡胶弹性的研究已有近 60 年历史, 人们从物理、化学和力学的角度分别使用各种方法理论试图去描述橡胶材料的真实力学行为。橡胶构件的设计目前主要采用一些复杂的数值技术。随着计算力学的飞速发展和橡胶工程应用的广泛需求, 需要发展更为精确, 实用且能与有限元分析理论相融合的本构模

收稿: 2013-07-15; 修回: 2013-10-06;

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275265, 51175286, 51173110);

作者简介: 危银涛, 清华大学汽车系教授, 研究领域包括轮胎/车辆动力学、橡胶本构与疲劳理论、振动-声学仿真、有限元方法与 CAE 工程。应用研究包括轿车和卡车轮胎、橡胶减振器、空气弹簧、橡胶衬套等工程结构的分析设计与开发;

\* 通讯联系人, E-mail: weiyt@tsinghua.edu.cn.

型。橡胶弹性的分子统计理论<sup>[5~8]</sup>发端于上世纪 40 年代,有限变形理论开始于上世纪 50 年代<sup>[9~13]</sup>,应变能形式的橡胶本构理论在上世纪 70 年代走向成熟<sup>[14, 15]</sup>。随着数值技术的发展,对橡胶超弹性本构模型的精度、稳定性和参数化都有了更高的要求。

### 1.1 基于热力学统计方法的本构模型

热力学统计方法假设橡胶大分子是随机取向的长链分子,并通过分子链节点处的化学交联而形成交联网络结构。橡胶类材料的大分子量使得其分子链网络具有许多不同的构象,在其变形过程中构象将不断地改变,这使得橡胶长分子链具有特有的柔顺性。而链的柔顺性从宏观表现出的就是橡胶材料的超弹性。分子链越柔顺,构象数就越多,构象熵就越大,因此橡胶的超弹性也称为熵弹性。1943 年 Treloar 把高斯统计理论应用到描述橡胶材料的宏观行为。考虑橡胶在外力作用下发生变形时,橡胶内分子链网随之发生仿射变形,最后从构象熵的改变推导出橡胶材料的弹性应变能函数:

$$W_G = \frac{NKT}{2}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (1)$$

式中的  $N$  为平均单位体积内的网链数; $K$  为玻尔兹曼常数; $T$  为绝对温度,  $\lambda_i$  为主伸长率。

后面可以看到高斯统计模型与不可压缩的 Neo-Hooke 模型等价。由于高斯统计模型是基于假设分子末端距远小于分子链的全部延展的长度,没有考虑到橡胶分子链的延展的有限性,因此它不能用来描述分子链的伸展过程,该模型只适应于小变形的情况。有鉴于此,非高斯统计模型被进一步用来提高统计模型精度和适用范围,包括 4 链模型<sup>[8]</sup>、8 链模型<sup>[16]</sup>等。

Kaliske 和 Heinrich 提出了一种扩展的管子模型描述受约束状态的橡胶网络结构,他们提出的模型适合于有限元方法的实施。Marckmann 和 Verron<sup>[17]</sup>在对比 20 种橡胶本构模型之后认为, Kaliske 和 Heinrich 的模型是目前最好的橡胶本构模型。由此可见发展具有物理意义的橡胶本构模型,仍然具有广阔的发展前景。

### 1.2 基于连续介质力学唯像理论模型

1.2.1 基于应变不变量表示的连续介质唯像模型 基于不变量的模型将应变能密度表示为格林变形张量的三个不变量的函数:

$$W(E) = W(I_1, I_2, I_3) \quad (2)$$

考虑橡胶为不可压缩超弹性材料,则第三不变量  $I_3 = 1$ 。Rivlin 提出级数形式的应变能函数<sup>[9~11]</sup>:

$$W_R = \sum_{i,j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (3)$$

如果取其第一项,则可以得到以应变不变量表示的 Neo-Hookean 模型:

$$W_{NEH} = C_{10}(I_1 - 3) \quad (4)$$

取前两项,则可得到目前有限元中最广泛应用的 Mooney-Rivlin 模型:

$$W_{MR} = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (5)$$

Mooney-Rivlin 模型的剪切模量不随材料的剪切应变变化,能说明单轴拉伸实验中高斯统计模型在小变形时与实验数据的偏差,可以较好地拟合不可压缩橡胶材料中等应变范围内的行为。但 Mooney-Rivlin 模型的精度取决于多轴数据。

有人试图利用取高阶项的形式来解决 Mooney-Rivlin 模型所存在的缺陷。理论上应变能函数所取的项数越多,模型将越可能准确地描述材料的真实力学行为。但此时需要确定的参数也会越多,模型会越来越复杂,不便于工程应用。而且虽然高阶应变能函数比低阶应变能函数对实验数据拟合得更好,但是它对实验数据以外的材料的力学行为无法准确预测,有时甚至还不如那些简单形式的应变能函数。因此对于模型应变能函数的选取,并不能仅以高阶项来换取实验数据拟合准确度,应当综合考虑实验数据形式,根据经验选择级数项。

Gent<sup>[18]</sup>和 Yeoh<sup>[19]</sup>曾尝试采用  $I_1$  的高阶项来修正应变能函数,以提高模型对橡胶类材料大变形的拟合准确度。Yeoh 模型应变能函数:

$$W(I_1, I_2) = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_2 - 3)^3 \quad (6)$$

模型加入了  $I_1$  的高阶项后,在大应变条件下模型拟合结果与实验数据吻合较好,并且仅以单轴拉伸实验确定的材料常数适用于多种变形形式。但是对小变形却并不准确。Gent 引入橡胶分子链有限伸长概念,认为第一不变量应该存在一个最大值  $I_m$ , 提出如下的应变能函数:

$$W = -\frac{E}{6}(I_m - 3)\ln\left[1 - \frac{I_1 - 3}{I_m - 3}\right] \quad (7)$$

式中  $E$  是小变形拉伸的弹性模量。Boyce<sup>[20]</sup>证明了将 Gent 模型级数展开后可以得到仅包含  $I_1$  项的缩减多项式模型。

我国高玉臣院士<sup>[21]</sup>1997 年提出的应变能公式:

$$W = a(I_1^n + I_1^{-n}) \quad (8)$$

式中  $a, n$  是材料参数。该应变能函数可以描述中等以上应变橡胶材料的力学行为。

1.2.2 基于伸长率的连续介质模型 常用的以不变量表示应变能函数关系式通常都比较复杂,事实上考虑橡胶为各向同性超弹性体,其应变能函数都可用主伸长率来表征,即

$$W(I_1, I_2, I_3) = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (9)$$

由此 Ogden<sup>[14]</sup>提出以主伸长率来表示的应变能函数

$$W(\lambda) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (10)$$

式中  $\mu_i$  和  $\alpha_i$  为材料常数,  $\alpha_i$  可取任何实数值。为与经典的弹性理论一致,  $\sum_i \mu_i \alpha_i = 2G_0$ 。当  $i = 1, \alpha_1 = 2$  时, Ogden 模型与 Neo-Hookean 模型相同;当  $i = 1$  和  $2, \alpha_i = 2$  和  $-2$  时可得到以主伸长率表示的 Mooney-Rivlin 模型。

### 1.3 常用超弹性本构实验结果与模型适用性讨论<sup>[22, 23]</sup>

文献<sup>[22, 23]</sup>采用单轴拉伸(St)、平面拉伸(Pt)以及等双轴拉伸(Et)等三类基本变形试验,考察了几种常见超弹性本构模型对试验数据的拟合能力,并探讨在三类基本试验不齐全情况下超弹性本构模型的预测能力和模型选取策略。他们的结论是为尽量准确地描述橡胶材料的大变形和复杂变形行为,根据基本变形试验数据的齐全程度,对超弹性本构模型应采取不同的选取策略。在 St、Pt 和 Et 基本变形试验齐全的情况下,依次优先选用 Ogden( $N=3$ )、Yeoh 和 Arruda-Boyce 模型;只有两类基本变形试验时,应包括 Et 试验,这时 Ogden( $N=3$ )模型对第三类变形行为给出准确模拟;仅有 St 试验时,优先选取 Arruda-Boyce 模型。

橡胶本构模型除了精度、适用范围和参数化方便之外,另外一个重要的要求是与有限元分析相适应。文献<sup>[4]</sup>给出了以第二类克希荷夫应力和格林应变表示的橡胶类材料本构关系,其中用到了变形梯度的乘法分解。结合 Yeoh 模型的具体形式,给出了本构关系的具体数值实现。乘法分解可以将变形梯度分解为等容变形部分和体积变形部分,这对处理不可压缩问题非常有利。将 Yeoh 模型与变形梯度的乘法分解结合,给出橡胶类材料的本构关系及详细的数值实现方式。采用三类变量变分原理,将静水压力、体积变形和位移场进行独立的处理,避免了体积闭锁现象。

## 2 橡胶黏弹性本构模型

橡胶线黏弹性本构关系主要被用来描述橡胶常温下发生小应变时的响应。最简单的线黏弹性模型是 Maxwell 模型和 Kelvin 模型,他们的应力应变关系如下:

$$\begin{aligned} \sigma + p_1 \dot{\sigma} &= q \dot{\epsilon}, \text{ for Maxwell} \\ \sigma &= q_0 \epsilon + q_1 \dot{\epsilon}, \text{ for Kelvin} \end{aligned} \quad (11)$$

Maxwell 模型可以体现应力松弛,但无法反映材料的蠕变过程。而 Kelvin 模型则可以体现材料蠕变过程,却不能呈现应力松弛现象。同时这两个模型所反映的应力松弛或蠕变过程都只有一个含时间的指数函数,不能反映橡胶类材料的复杂的流变行为。

通过并联多个 Maxwell 体可以得到了广义的 Maxwell 模型,如 Kailske<sup>[3]</sup>并联一个非线性弹簧和  $N$

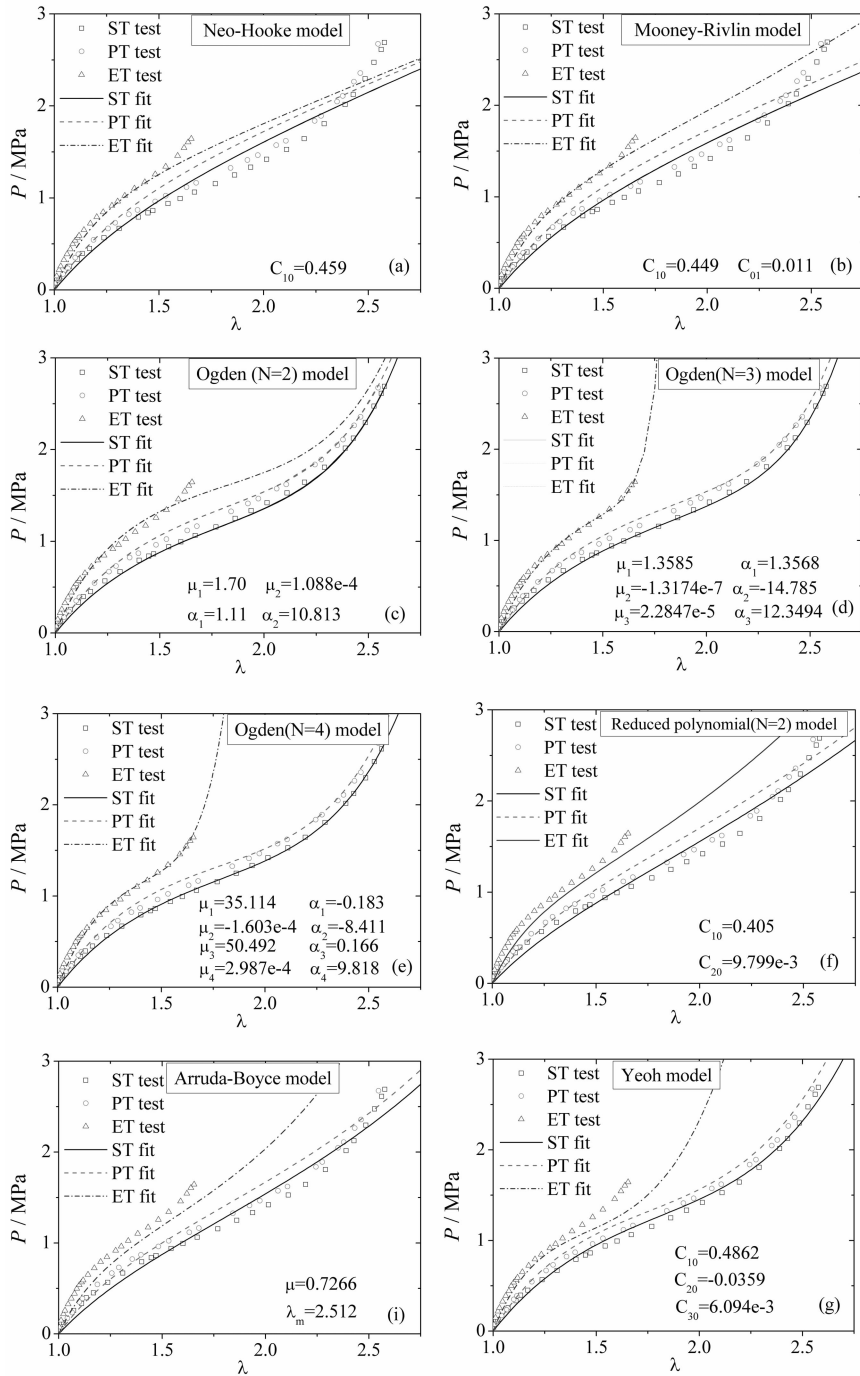


图 1 各种超弹性本构模型对橡胶基本试验数据的拟合能力

Figure 1 The fitting ability of different rubber hyperelastic constitutive model for test data

个 Maxwell 单元来建立未硫化胶的黏弹性模型,如图 2 所示。

其中的非线性弹性部分由应变能密度函数控制,应变能密度函数表示为:

$$\Psi = U(J) + W(F) \tag{12}$$

式中第一项代表的是体积应变能密度,第二项表示的等容应变能密度, $F$  是变形梯度,  $J = \det F$ 。显然非线性弹性部分可以用普通的超弹性本构关系表示。

而各个 Maxwell 单元上的应力可以用演化方程表示如下:

$$\dot{h}_j + \frac{h_j}{\tau_j} = \xi_j \cdot \sigma_0 \tag{13}$$

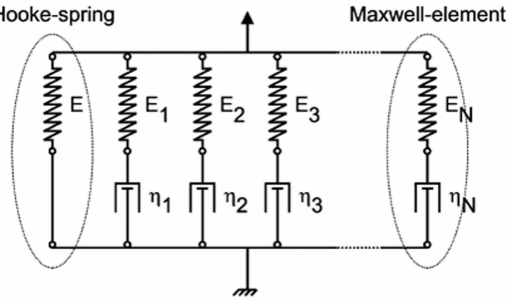


图 2 广义非线性 Maxwell 模型

Figure 2 The generalized nonlinear Maxwell model

上式中  $h_j$  是 Maxwell 单元上的应力,  $\sigma_0$  是弹簧单元上的应力,  $\tau_j$  是松弛时间,  $\xi_j$  是待定的材料常数。总的应力等于弹簧的应力和 Maxwell 单元上的应力之和

$$\sigma(t) = \sigma_0(t) + \sum_{j=1}^N h_j \quad (14)$$

Kailske<sup>[3]</sup>用三种试验——单轴拉伸、圆柱压缩和简单剪切试验数据来确定模型中的参数,试验在不同的温度和速率下进行,他们的研究表明,仅仅用三个 Maxwell 单元就可以比较好地拟合胎面胶在未硫化状态下的黏弹性行为,如图 3 的实验和拟合比较所示。

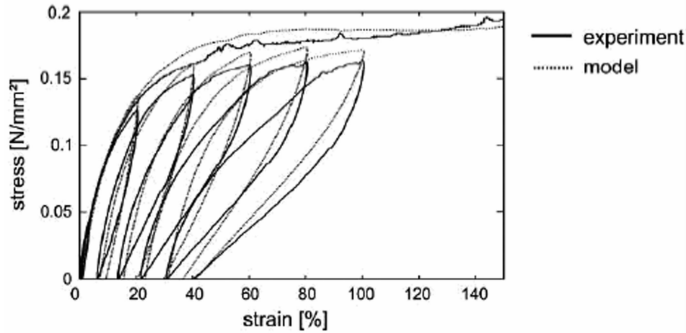


图 3 广义非线性 Maxwell 模型与实验数据的比较<sup>[3]</sup>

Figure 3 The compared between generalized nonlinear Maxwell model and experiment data

### 3 橡胶热-粘弹性耦合本构模型

作为粘弹性材料,橡胶在周期性应变(或应力)作用下的能量损耗及生热预报是热力响应分析的重要内容,常用方法是利用复模量表示粘滞效应计算温升。近十多年来,许多文献将橡胶作为热弹性固体,考虑或者不考虑粘弹性,研究有限变形下的热力耦合行为,基本方法是利用热力学能量守恒和耗散定律,将 Helmholtz 自由能分解为体积变形相关和剪切变形相关的部分,对温度和变形进行分离变量,基于热力学框架建立变形与温度耦合的本构关系。Holzapfel<sup>[24]</sup>等将 Ogden 等温本构模型推广提出一种热力学势,考虑热传导定律,建立热-力耦合的橡胶本构关系。Aboudi<sup>[25]</sup>引入温度影响,建立橡胶的热力耦合本构关系,并利用多尺度均匀化方法应用于纤维增强橡胶,通过算例讨论了耦合的影响。Lion<sup>[26]</sup>提出一个更完善的流变学模型,考虑粘弹性和热力耦合,对于位移梯度进行热-力和弹性-非弹性极分解,根据分解的位移梯度,定义相应的应变和对偶应力,假设自由能由热弹性、粘弹性和纯热能组成,利用耗散定律建立本构方程和演化方程,试验结果表明,理论预测结果总体趋势正确,但细节不够好,可能与材料常数和材料函数的选择有关。目前,采用热力学耦合机理建立的大变形热-粘弹性模型,如 Miehe<sup>[27]</sup>模型和 Holzapfel-Simo<sup>[28]</sup>模型等研究橡胶材料的粘性只能采用线性微分法。简单实用的热力耦合模型为:

Reese 等<sup>[29]</sup>根据橡胶材料大变形时热-粘弹性,建立了大变形的热-粘弹性本构理论,其模型基于将

Helmholtz 自由能( $\Psi$ )分为平衡( $E_q$ )自由能( $\Psi_{EQ}$ )与非平衡(Neq)自由能( $\Psi_{NEQ}$ )两部分,平衡自由能与时间无关,非平衡自由能反映时效和粘性影响。

$$\begin{aligned}\Psi &= \Psi_{EQ} + \Psi_{NEQ} \\ \Psi_{EQ} &= (e_0)_{EQ} \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) + f_{EQ}(\Psi_0)_{EQ} + ct(T) \\ \Psi_{NEQ} &= (e_0)_{NEQ} \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) + f_{NEQ}(\Psi_0)_{NEQ}\end{aligned}\quad (15)$$

式中,  $e_0$  为单位体积的内能,  $T_0$  为初始绝对温度,  $\Psi_0$  为初始自由能,  $c$  为热容量,  $f$  为无量纲函数。

Horgan 等<sup>[30]</sup>考虑到橡胶的热-粘弹性,用有理函数建立了橡胶材料极限伸长时的非线性热-粘弹性本构模型,并研究了非均匀变形问题。不可压缩各向同性热-粘弹性橡胶材料极限伸长时的热-粘弹性模型为:

$$\Psi = -\frac{G_s}{2} \frac{T}{T_0} \lambda_m \left[1 + b \left(\frac{T - T_0}{T_0}\right)\right] \ln \left\{1 - \frac{I_1 - 3}{\lambda_m [1 + b(T - T_0)/T_0]}\right\} + d \left(T - T_0 - T \ln \frac{T}{T_0}\right) \quad (16)$$

式中,  $G_s$  为等温无穷小剪切模量,  $\lambda_m$  为等温平均最大伸长,  $d$  是材料常数,  $b$  为最大伸长与温度的相关因数。

## 4 橡胶加工流变模型

为了成功模拟胶料在螺杆挤出机中的流动以及在模具中的变形,有必要了解填充橡胶的流变性能。填料的加入使得橡胶的流变行为非常复杂,在稳定的剪切流动中,胶料表现出黏度随剪切速率快速下降的趋势,在很低的剪切速率下,黏度变得无限制增高。另外可能还存在一定的屈服应力,低于该应力时胶料没有流动,这些行为可以用如下的流变本构来表示<sup>[31]</sup>:

$$\sigma_{12} = Y + \frac{A\dot{\gamma}}{B\dot{\gamma}^{1-n}} \quad (17)$$

上式预测了当剪切速率趋向于零时的屈服值和高剪切速率下高度的非牛顿行为。在高剪切速率下,上式变为:

$$\sigma_{12} = \left(\frac{A}{B}\right) \dot{\gamma}^n = k\dot{\gamma}^n \quad (18)$$

上式代表了剪切应力和剪切速率之间的幂律行为。

## 5 总结

从流变模型到超弹性模型,橡胶表现出绝然不同的力学行为,因此在从设计、加工到使用的各个阶段,橡胶需要应用不同的本构模型。是否有可能采用统一形式的本构模型,这种统一指的是数学形式的统一,然后针对不同的状态采用不同的参数。阿克隆大学的 Leonov 课题组<sup>[32]</sup>在此方面展开了不懈的努力,他们的研究似乎表明,有可能建立一种针对不同交联状态的橡胶的统一形式的本构模型,这从理论和工程两方面来说都具有很大的吸引力。

橡胶本构模型是一个仍在快速发展,而且内容十分广阔的领域。本文主要针对计算机仿真可能应用到的橡胶本构模型进行了总结。有几个重要的方面,如 Mullins 效应和 Payne 效应、裂纹扩展与断裂、疲劳与寿命、老化、细观-微观-分子动力学方法、生物力学、补强与增韧、摩擦与磨损等还没有涉及,这些有待工程师和科学家共同探讨。

## 参考文献:

- [1] 卓家寿, 黄丹. 工程材料的本构演绎, 2009, 北京: 科学出版社.
- [2] 韩式方. 非牛顿流体本构方程和计算解析理论, 2000, 北京: 科学出版社.
- [3] Kaliske M, Zopf C, Brueggemann C, Rubber Chem. Technol, 2010, 83(1): 15.

- [4] 危银涛,杨挺青,杜星文. 固体力学学报, 1999, 20(4): 281~189.
- [5] Mooney M. J. Appl. PHYS., 1940, 11(9): 582~592.
- [6] James H M, Guth E. J. Chem. Phys., 1943, 11(10): 455~481.
- [7] Treloar L R G. Rubber Chem. technol, 1943, 17(2): 7.
- [8] Flory P J. Chemical Reviews, 1944, 35(1): 51~75.
- [9] Rivlin R S. Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A., 1948, 240(822): 459~490.
- [10] Rivlin R S. Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A., 1948, 240(823): 509~525.
- [11] Rivlin R S. Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A., 1948, 240(822): 491~508.
- [12] Green A E, Rivlin R S. Arch. Ration. Mech. Anal, 1957, 1(1): 1~21.
- [13] Mullins L, Tobin N R. Rubber Chem. technol, 1957, 30(2): 555~571.
- [14] Ogden R W. Proc. R. Soc. Lond. A, Math. Phys Sci., 1972, 326(1567): 565~584.
- [15] Treloar L R, Hopkins H G, Rivlin R S, Ball J M. Proc. R. Soc. Lond. A, Math. Phys Sci., 1976, 351(1666): 301~330.
- [16] Arruda E M, Boyce M C. J Mech. Phys. Solids, 1993, 41(2): 389~412.
- [17] Marckmann G., Verron E. Rubber Chem. Technol, 2006, 79(5): 835~858.
- [18] Gent A. Rubber Chem. Technol, 1996, 69(1): 59~61.
- [19] Yeoh O. Rubber Chem. Technology, 1990, 63(5): 792~805.
- [20] Boyce M C, Arruda E M. Rubber Chem. Technol, 2000, 73(3): 504~523.
- [21] Gao Y C. Theor Appl Fract Mec, 1997, 26:155~162.
- [22] 胡小玲,刘秀,李明,罗文波. 工程力学. in press.
- [23] 龚科家,危银涛,叶进雄. 工程力学, 2009, 26(6): 193~198.
- [24] Holzapfel G A, Sirno J C. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg, 1996, 132(1): 17~44.
- [25] Aboudi J. Int. J Solids. Struct., 2002, 39(9): 2587~2612.
- [26] Lion A J. Mech. Phys. Solids, 1997, 45(11): 1805~1834.
- [27] Miehe C. Zur numerischen Behandlung thermomechanischer Prozesse, 1988, Technischer Bericht, Institut für Baumechanik und numerische Mechanik der Universität Hannover.
- [28] Holzapfel G A, Simo J C. Int. J Solids. Struct., 1996, 33(12): 3019~3304.
- [29] Reese S, Govindjee S. Mech. Time-depend. Mater., 1998, 1(4): 357~396.
- [30] Horgan C, Saccomandi G. J Mech. Phys. Solids, 2003, 51(2): 127~1146.
- [31] White J, Potente H. Screw Extrusion, 2003, Munich: Carl Hanser Verlag GmbH&Co. KG.
- [32] Joshi P, Leonov A. Rheologica acta, 2001, 40(4): 350~365.

## Research Progress on Constitutive Model of Filled Rubber

WEI Yin-tao<sup>1\*</sup>, FANG Qing-hong<sup>2</sup>, JIN Zhuang-bing<sup>1</sup>, FENG Xi-jin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Material Science and Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

**Abstract:** Filled rubber is a type of multi-phase composite reinforced by nanoparticles. The coexistence of the rubber crosslinks and the secondary network formed by nanoparticles leads to extremely complicated mechanical behaviors like large deformation visco-hyperelastic, dynamical stress softening, self-heating effects etc. How to describe these behaviors using a reasonable constitutive model is a popular and challenge subject for rubber researchers. In recent years the advancement of the simulation technology makes strong requirements for the reliability, accuracy and numerical stability of rubber constitutive model. This paper presents a review of the state of the art rubber constitutive models, especially with regard to the research progresses on hyperelastic, viscoelastic and rheological models. Furthermore, from the perspective of the numerical compatibility between FEA method and rubber constitutive model application, this paper discusses the precision, application range and parameterization of some commonly used rubber constitutive models, which provides guidance to rubber mechanical simulation. Moreover, the challenge and directions for the current rubber constitutive model research has been explored.

**Key words:** Filled rubber; Constitutive model; Rheology; Viscoelasticity; Hyperelasticity