发泡硅橡胶本构模型与力学性能的研究

柯玉超^{1,2},王识君¹,吴 蕾¹

(1. 安徽中鼎密封件股份有限公司, 安徽 宁国 242300; 2. 清华大学 机械工程学院, 北京 100084)

摘要:基于Neo-Hookean与Yoeh超弹性材料本构模型和发泡硅橡胶细观结构,将发泡硅橡胶的孔隙率作为参数引入 应变能密度函数和本构方程中,建立了发泡硅橡胶力学性能预测模型,同时采用有限元分析和试验方法,对发泡硅橡胶 单轴压缩和简单剪切两种工况下的力学性能进行研究。通过比较理论模型、有限元模拟和试验结果,发现采用基于发泡 硅橡胶细观结构建立的理论模型可以有效地描述发泡硅橡胶力学性能。试验研究了加载速率和环境温度对发泡硅橡胶 力学性能的影响,为发泡硅橡胶的应用提供依据。

关键词:超弹性材料;发泡硅橡胶;本构模型;有限元分析;力学性能

中图分类号:O241.82;TQ333.93;TQ336.4⁺2 文献标志码:A 文章编号:1000-890X(2019)03-0177-07 DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2019.03.0177

发泡硅橡胶是由硅橡胶和配合剂按一定比例 混合并硫化而成的柔软弹性材料,其具有多孔泡 沫结构,因此兼具硅橡胶优良的性能和泡沫材料 的可压缩性^[1-2],被广泛用于汽车、航天、电脑、机械 电子等行业,起密封、隔热、减震的作用。近年来, 为了保证新能源汽车电池组的安全,发泡硅橡胶 被用于动力电池包的密封,确保电池组满足电器 设备外壳防护等级IP67^[3]设计要求。因此,发泡硅 橡胶力学性能的分析与表征十分重要。

由于发泡硅橡胶微观结构复杂,其力学性能 具有典型的非线性特征,基于唯象法的传统连续 介质模型常常难以描述发泡硅橡胶在大变形下的 行为^[4]。以单向压缩为例,发泡硅橡胶在压缩变 形过程中通常会经历3个阶段:孔壁弯曲导致的线 弹性小变形阶段,孔壁弹性屈曲导致的大变形阶 段,压缩致密后阶段^[5]。为了预测发泡硅橡胶受 载下的力学响应,可利用实体硅橡胶部分的超弹 性本构模型,重构发泡硅橡胶的多孔微结构,采 用数值模拟的方法得到精确的结果^[6-7],但此方法 在大多数情况下计算量过于庞大。也有学者^[8-10] 假设发泡硅橡胶的内部孔隙结构符合一定的分布 规律,如按一定尺寸分布的椭球体、正十四面体^[11] 等,基于均质材料和细观力学的方法,推导出含有 内部结构信息的本构关系,从而预测材料的力学 性能。发泡橡胶的宏观力学性质主要依赖于微结 构中孔隙的大小、形状和分布,利用粗粒化变换的 方法^[12]将实际的孔隙粗粒化为均质的球孔代表胞 元,极大地简化了连续介质模型的推导。

本工作通过试验与数值计算相结合的方法, 基于细观结构,分别采用Neo-Hookean和Yoeh模 型建立发泡硅橡胶力学性能预测模型,利用有限 元法模拟发泡硅橡胶试样在压缩和简单剪切两种 工况下的受力与变形,并与试验结果进行对比,最 后试验研究了加载速率和环境温度对发泡硅橡胶 性能的影响,以期为发泡硅橡胶的应用提供理论 和试验依据。

1 发泡硅橡胶及其密封方式

本研究发泡硅橡胶试样如图1所示,外观为红 色,上下表面致密无孔,中间为多孔结构,几何尺 寸为:长度 41.78 mm,宽度 18.44 mm,厚度 5.32 mm。作为密封条使用时,一般在发泡硅橡胶 一面粘贴双面胶,通过双面胶与电池箱粘连在一 起,另一面连接电池箱盖板。本工作涉及发泡硅 橡胶密封条正常工作时压缩率为62.4%,远大于一

作者简介:柯玉超(1988—),男,安徽宁国人,安徽中鼎密封件股份有限公司工程师,安徽中鼎密封件股份有限公司与清华大学机械学院联合招收博士后,主要从事橡塑密封机理与应用的研究。

E-mail:hgckeyuchao14@163.com



图1 发泡硅橡胶密封条试样 般实体橡胶。

2 本构模型与数值模拟方法

橡胶一般可以认为是超弹性材料,对于均匀 各向同性的实体橡胶,其应变能密度W可以表示为 左Cauchy-Green变形张量**B**的函数,即

$$W = W(B) \tag{1}$$

或者可以写成以变形张量B的3个不变量 I_1, I_2, I_3 表示的函数形式:

$$W = W(I_1, I_2, I_3)$$
 (2)

发泡硅橡胶性能与传统橡胶不同,在发泡硅 橡胶加载的初始阶段,由于内部空洞的存在,橡胶 发生完全可压缩的变形(泊松比v≈0),当橡胶中 的空洞被压实后,材料又呈现出与传统橡胶类似 的性质。

采用孔隙率 f_0 表示发泡硅橡胶的孔隙大小,发 泡硅橡胶的应变能密度W就可以由基体橡胶的材 料参数,即初始时孔隙率 f_0 和变形张量B的不变量 I_1, I_2, I_3 决定:

$$W = W(I_1, I_2, I_3, f_0)$$

(3)

为了得到发泡硅橡胶应变能密度表达式,可 以使用厚壁球壳的模型表示内部多孔结构^[8],如 图2所示。假设球壳在3个主方向上的伸长分别为



图2 发泡硅橡胶内部的球壳模型

 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3,$ 对于实体部分上的每一点,都有对应的 应变能密度W和对应的不变量 I_1, I_2, I_3 。虽然发泡 硅橡胶整体表现出极高的可压缩性,但实体部分 橡胶的压缩率很小,可以认为不可压缩。对于不 可压缩材料,变形梯度张量 F的Jacobi行列式j可 以表示为j=det(F)=1,由于 $B = FF^{T}$,那么 I_3 = det(B)=1在球壳内任意一点都成立。应变能密 度简化为 $W = W(I_1, I_2)$,只与第一和第二不变量 I_1 和 I_2 有关。球壳内任意一点的不变量 I_1 和 I_2 可以表 示为宏观主伸长 $\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2, \hat{\lambda}_3,$ 宏观不变量 $\hat{I}_1, \hat{I}_2, \hat{j}$ (宏观变形梯度的Jacobi行列式),以及参考构型的 坐标X, Y, Z的函数,即

$$I_{1} = \frac{1}{\hat{f}^{2/3}} [\hat{I}_{1}\psi^{2} + \frac{1}{R^{2}}(\hat{\lambda}_{1}^{2}X^{2} + \hat{\lambda}_{2}^{2}Y^{2} + \hat{\lambda}_{3}^{2}Z^{2})(\psi^{-4} - \psi^{2})]$$
(4)

$$I_{2} = \hat{j}^{2/3} \left[\frac{\hat{I}_{1}}{\hat{j}^{2} \psi^{2}} + \frac{1}{R^{2}} \left(\frac{X^{2}}{\hat{\lambda}_{1}^{2}} + \frac{Y^{2}}{\hat{\lambda}_{2}^{2}} + \frac{Z^{2}}{\hat{\lambda}_{3}^{2}} \right) \left(\psi^{4} - \psi^{-2} \right) \right]$$
(5)

式中,从参考构型到当前构型的映射函数 $\psi = \psi(R) = [1 + (\hat{j} - 1)(b/R)^3]^{1/3}$,参考点到坐标原点的径向距离 $R = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2}$ 。利用以上公式,可以得到整个球壳代表单元上对应变能密度的积分,并除以球的体积 $V_0 = 4\pi b^3/3$,b为球的外半径(见图2),则得到发泡硅橡胶整体的平均应变能密度 \hat{w} :

 $\hat{W} = \frac{1}{V_0} \int_{bf_0^{1/3}}^{b} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} W(I_1, I_2, I_3) R^2 \sin\theta d\theta d\phi dR \quad (6)$ 其中, θ , φ , R为参考构型球坐标系下的3个分量。

由此,利用平均应变能密度可以得到发泡硅橡胶的平均柯西应力 $\hat{\sigma}$ 。

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{2}{\hat{j}} \frac{\partial \hat{W}}{\partial \hat{I}_1} \hat{\boldsymbol{B}} + \frac{2}{\hat{j}} \frac{\partial \hat{W}}{\partial \hat{I}_2} (\hat{I}_1 \hat{\boldsymbol{B}} - \hat{\boldsymbol{B}}^2) + \frac{\partial \hat{W}}{\partial \hat{j}} \boldsymbol{I} \quad (7)$$

其中,I为二阶单位张量。

(1)如果把实体橡胶当做Neo-Hookean材料, 其应变能密度W_N的表达式为

$$W_{\rm N} = \frac{\mu}{2} (I_{\rm I} - 3) + W_{\rm v} \tag{8}$$

其中,μ是极小变形时的剪切模量,W,是应变能密度中的体积变形分量,在不可压缩的情况下体积 没有发生变化,则W,为零。将表达式(8)代入球壳的积分中,得到平均应变能密度为

$$\hat{W}_{\rm N} = \frac{\mu}{2} \{ \hat{I}_{\rm I} [2 - \frac{1}{\hat{j}} - \frac{f_0 + 2(\hat{j} - 1)}{\hat{j}^{2/3} \eta^{1/3}}] - 3(1 - f_0) \}$$
(9)

179

式中, $\eta = [1 + (\hat{j} - 1)/\hbar]$ 。由式(9)可以看出, \hat{W}_{Λ} 只由 $\mu, f_0, \hat{I}, \pi \hat{j}$ 决定,那么发泡硅橡胶受载荷时的柯西应力 σ 就可以通过平均应变能密度导出,即

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{2}{\hat{j}} \frac{\partial \hat{W}_{N}}{\partial \hat{I}_{1}} \hat{\boldsymbol{B}} + \frac{\partial \hat{W}_{N}}{\partial \hat{j}} \boldsymbol{I}$$
(10)

导数项为

$$\frac{\partial \hat{W}_{\rm N}}{\partial \hat{I}_{\rm 1}} = \frac{\mu}{2} \left[2 - \frac{1}{\hat{j}} - \frac{f_{\rm 0} + 2(\hat{j} - 1)}{\hat{j}^{2/3} \eta^{1/3}}\right]$$
(11)

和

$$\frac{\partial \hat{W}_{\rm N}}{\partial \hat{j}} = \frac{\mu}{2} \hat{I}_{\rm I} \left[\frac{1}{\hat{j}^2} - \frac{1}{3\hat{j}^{2/3}\eta^{1/3}} \frac{(4 - f_0)\eta + (1 - f_0)}{f_0\eta^2 + (1 - f_0)\eta} \right] (12)$$

特别地,当孔隙率f₆趋近于零时,退回到不可压缩的Neo-Hookean模型,即

$$\hat{W}_{\rm N} = \frac{\mu}{2}(\hat{I}_{\rm I} - 3) \tag{13}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\mu} \hat{\boldsymbol{B}} - \boldsymbol{\mu} \boldsymbol{I} \tag{14}$$

(2) Yeoh模型中,认为∂/∂*I*₂的导数项远小于 ∂/∂*I*₁,因此可以舍去应变能密度中对*I*₂的求导项, 即可采取以下形式:

$$W_{\rm Y} = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 + W_{\rm Y}$$
(15)

其中,*C*₁₀,*C*₂₀,*C*₃₀是材料参数,若材料不可压缩且 没发生体积变形,则W,为零。

利用式(15)对球壳内部进行积分,从而得到 平均应变能密度,求取应力的表达式,这些步骤与 Neo-Hookean模型中的情况相似。由于引入了高 阶项,能够描述大变形下发泡硅橡胶的响应。

(3)有限元方法的数值模拟。本研究采用唯 象的有限元模拟,即模型不直接重构发泡硅橡胶 的微结构,认为发泡硅橡胶是均质、可压缩的超 弹性材料,应变能密度是主伸长的函数,其表达 式为

$$\hat{W} = \sum_{i=1}^{N} \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\hat{\lambda}_1^{\alpha_i} + \hat{\lambda}_2^{\alpha_i} + \hat{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3)$$
(16)

利用试验中的单轴压缩和简单剪切获得的数 据拟合材料的参数 μ_i 和 α_i 。N的选取影响参数的数 量,在不考虑热变形的情况下,N=2时已经能很好 地描述发泡硅橡胶的响应。

如图3所示,构建一个与试样尺寸相同的长 方体发泡硅橡胶块,在8个顶点处对网格进行了 加密。 图3 发泡硅橡胶的有限元模型

3 试验理论和模拟结果与讨论

对发泡硅橡胶同时做单向拉伸和简单剪切试 验,并将实测结果、理论结果以及有限元模拟结果 三者进行比较。发泡硅橡胶的孔隙率 f_0 通过密度 得到: $f_0=1.0-\rho_p/\rho_s$ 。式中, ρ_p 是发泡硅橡胶的密 度, ρ_s 是实体硅橡胶的密度。测得试验所用发泡硅 橡胶的密度 ρ_p 为0.44 Mg•m⁻³,实体硅橡胶的密度 ρ_s 为1.25 Mg•m⁻³,则试样的孔隙率 f_0 为0.65。

Neo-Hookean理论模型中实体橡胶的参数µ 取值0.2 MPa。

Yeoh理论模型中实体橡胶的参数*C*₁₀, *C*₂₀和 *C*₃₀取值分别为0.102, -0.021和0.074。

3.1 单轴压缩试验

沿着X₁方向施加单向应变,在单轴压缩情况 下,主方向与坐标轴3个方向保持一致,则变形梯 度张量**F**和变形张量**B**可以用主伸长λ₁,λ₂和λ₃表 示为

$$\boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0\\ 0 & \lambda_2 & 0\\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0\\ 0 & \lambda_2^2 & 0\\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix}$$
(17)

变形张量B的第一不变量 I_1 和F的Jacobi行列式j可以表示为主伸长的函数,即

 $I_{1} = \lambda_{1}^{2} + \lambda_{2}^{2} + \lambda_{3}^{2}, j = \det(\mathbf{F}) = \lambda_{1}\lambda_{2}\lambda_{3}$ (18) $\exists \text{I} \text{I}, \underline{\omega} \not\equiv \lambda_{2} = \lambda_{3}, \exists \sigma_{22} = \sigma_{33} = 0_{\circ}$

将试验、理论和模拟的单轴压缩结果进行比较,如图4所示。

从图4可以看出,在压缩应变小于0.4的情况 下,Neo-Hookean和Yeoh两种理论模型以及有限 元模拟均与试验结果符合良好。当压缩应变大于 0.4时,Neo-Hookean模型结果偏小,并且随着压缩 应变的增大,与试验结果差距越来越大,因此Neo-Hookean模型难以正确反映大变形时的压缩响 应。Yeoh模型在大变形时仍然与试验结果符合较 好,与Neo-Hookean模型相比,Yeoh模型引入第一 不变量I₁的二阶和三阶项,能够表现出大变形时非 线性效应。有限元模拟采用试验数据点拟合得本





图4 压缩应力随应变的变化曲线

构模型,可以看到其结果与试验结果符合程度最 佳。有限元模拟采用了唯象的模型,不需要处理 内部复杂的孔隙结构,但缺点是针对每一种孔隙 率都必须给出特定的试验数据。

单轴压缩情况下,需要测出压缩方向上的正应力、正应变以及横向上的应变。Neo-Hookean和 Yeoh模型的优势在于将孔隙率作为参数引入了本 构关系中,定量地表示了结构信息的变化与本构 的关系。只需要得到实体橡胶材料的力学参数, 就可以通过Yeoh模型直接估测不同孔隙率的发泡 硅橡胶在受拉伸和压缩作用时的力学响应,如图5 所示。



图5 Yeoh模型模拟发泡硅橡胶在不同孔隙率下受 单向拉伸和压缩作用时的力学响应

3.2 简单剪切试验

在*X*₁-*X*₂平面上沿*X*₁方向施加一个剪切应变γ, 同时保持*X*₂方向上高度不变,形成一个简单剪切 变形过程。变形梯度张量*F*和变形张量*B*可以表 示为

$$F = \begin{bmatrix} 1 & \gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 + \gamma^2 & \gamma & 0 \\ \gamma & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(19)

变形张量B的第一不变量 I_1 和变形梯度张量F的 Jacobi行列式*i*可以表示为主伸长的函数,即

 $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = 3 + \gamma^2$, $j = \det(F) = 1$ (20) 式中, $X_1 - X_2$ 平面的主伸长为

$$\lambda_{1,2} = \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{2} \pm \gamma \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{4}}}$$
(21)

对应的 $X_1 - X_2$ 平面上的应力主方向 n_1 和 n_2 随剪切应 变变化而变化:

$$\boldsymbol{n}_{1} = (1, \sqrt{1 + \frac{\gamma^{2}}{4}} - \frac{\gamma}{2}, 0)$$
(22)

$$\boldsymbol{n}_2 = (1, -\sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{4}} - \frac{\gamma}{2}, 0)$$
(23)

由式(22)和(23)可见,当剪切应变y趋于零时,平面上的两个主方向相当于 X_1 和 X_2 的坐标轴旋转45°,发泡硅橡胶接近于纯剪切状态;当剪切应变 y趋近无穷时,平面上的两个主方向分别无限接近 剪切方向和垂直于剪切方向。显然,垂直于 X_1 - X_2 平面上的主伸长 λ =1,主方向 n_3 =(0,0,1)不随剪 切应变的变化而变化。

将试验、理论和模拟的简单剪切结果进行比较,如图6所示。

图6 简单剪切下发泡硅橡胶剪切应力随 剪切应变的变化曲线

从图6可以看出,在剪切方向上,理论模型与 试验的剪切应力-应变曲线拟合较好。当剪切应 变y大于0.35时,有限元拟合结果相对于试验结果 偏大,差距随着剪切应变y的增大而增大。有限元 的拟合需要单轴压缩和简单剪切两组测试的结 果,其中拟合单轴压缩所需要的数据在前文中已 经提到,而拟合简单剪切需要剪切应变、剪切应力 以及受约束方向上的正应力。

在简单剪切问题中,垂直于剪切方向被约束 住,因而在此方向存在正应力,以Neo-Hookean模 型为例,其应力状态可以表示为

$$\boldsymbol{\sigma} = \mu (1 - f_0) \boldsymbol{B} - \mu \frac{I_1}{3} (1 - f_0) \boldsymbol{I}$$
(24)

$$\sigma_{11} = \mu (1 - f_0) \cdot \frac{2}{3} \gamma^2$$
 (25)

$$\sigma_{22} = \mu (1 - f_0) \cdot (-\frac{1}{3}) \gamma^2$$
 (26)

$$\sigma_{12} = \mu (1 - f_0) \cdot \gamma \tag{27}$$

可见,剪切应力 σ_{12} 与剪切应变 γ 成正比,此外两个 方向的正应力 σ_{11} 和 σ_{22} 与剪切应力的平方 γ^2 成正 比。以上公式在受限制方向 X_2 上,其系数为负数, 剪切时受压力,说明Neo-Hookean模型表现出剪切 膨胀的特性。对于Yeoh模型,在受限制方向 X_2 上, 其正应力表达式为

$$\sigma_{22} = 2(1 - f_0)(-C_{10}\frac{1}{3}\gamma^2 + 2C_{20}\gamma^2 + 3C_{30}\gamma^4) (28)$$

简单剪切下,受限制方向正应力随剪切应变的变化如图7所示。由于本研究所用参数 $C_{10}>0$, $C_{20}<0, C_{30}>0$,因此正应力 σ_{22} 随着剪切应变 γ 的增大,先减小为负值,发生反转后增大为正。如果只考虑小变形、线弹性的情况,则 $\sigma_{11}=\sigma_{22}=0$,此时为纯剪切的情况。从图7可以发现,Neo-Hookean模型的正应力一直为负值(受压力),而Yeoh模型的正应力先为负值(受压力),然后随着剪切应变的

图7 简单剪切下发泡硅橡胶受限制方向正应力随 剪切应变的变化曲线

增大而反转最终变为正值(受拉力),这两种变化 趋势是由本构关系决定。虽然这两种模型都能拟 合剪切方向上X₁的剪切应力-应变响应,但却不能 很好地反映受约束方向X₂上的正应力。这表明, 发泡硅橡胶在简单剪切中表现出更多材料变形模 式,Neo-Hookean和Yeoh两种理论模型不足以完 全包含这些变形模式,如果仅考虑小变形的情况, 忽略应变二次项,则这两种理论模型足以预测发 泡硅橡胶的剪切性能。

3.3 结构非线性效应

为了研究发泡硅橡胶的粘弹性,对发泡硅 橡胶试样以3种不同速率进行压缩,结果如图8 所示。

图8 不同压缩速率下发泡硅橡胶的应力-应变曲线

从图8可以看出,随着压缩应变的增大,加载 速率所带来的影响渐渐显著。这反映了发泡硅橡 胶的粘弹性特点,并且该粘弹性效应受压缩应变 的调控,非线性的孔隙结构在其中发挥了重要的 作用。当压缩应变小于0.4时,3种加载速率下的 曲线基本重合,当压缩应变大于0.4时,3种速率下 的压缩应力明显不同。计算这3种加载速率对应 的应变率,分别为0.006,0.031和0.16 s⁻¹,均属于 低应变率的准静态加载。

不同环境温度下对发泡硅橡胶进行压缩测试,研究环境温度对压缩行为的影响,结果如图9 所示。

从图9可以看出,当压缩应变小于0.4时,不同 温度下的压缩应力基本重合,表现出对温度的不 敏感性,当压缩应变大于0.4时,压缩应力随温度 的下降而增大。低温降低了硅橡胶中高分子链的

图9 不同环境温度下发泡硅橡胶单轴压缩的 应力-应变曲线

流动性,在受压缩情况下限制了硅橡胶内分子间 的相对移动,从而表现出低温硬化特征。

综合考虑不同加载速率和环境温度对发泡 硅橡胶进行单轴压缩的结果,可以发现发泡硅橡 胶中的结构非线性效应。当压缩应变小于0.4时, 加载速率和环境温度对发泡硅橡胶的力学响应影 响很小,表现出发泡硅橡胶对加载速率和环境温 度的不敏感性。然而在实际应用过程中,这样的 压缩量对于实体橡胶密封件来说已经足够大,其 力学性能对加载速率和环境温度会有极大的依赖 性。得益于多孔结构的作用,发泡硅橡胶的压缩 变形机制与实体硅橡胶完全不同,以本研究中压 缩应变小于0.4为例,发泡硅橡胶内部的变形主要 是孔壁的弯曲导致的空隙塌陷,其中涉及到屈曲 和不稳定性问题[13]。图8和9的结果表明,发生在 发泡硅橡胶内的孔隙塌陷和屈曲过程基本不受加 载速率(低应变率下)和环境温度的影响。但是, 当压缩应变持续增大时,发泡硅橡胶的孔隙率下 降,力学性质接近实体橡胶,从而又表现出对加载 速率和环境温度的依赖性。

4 结论

通过使用球壳代表单元表征发泡硅橡胶内 部微结构,根据实体橡胶的材料本构关系及材料 参数,将孔隙率作为参数引入发泡硅橡胶的本构 关系中,建立了发泡硅橡胶力学性能预测模型。 针对采用的Neo-Hookean和Yeoh两种实体橡胶材 料模型,分别进行了压缩和简单剪切的拟合,并且 与试验和有限元模拟的结果进行比较。得到如下 结论。

(1)发泡硅橡胶在单轴压缩试验中,相较于 Neo-Hookean模型受限于描述小变形的情况, Yeoh模型能够很好地反映发泡硅橡胶在大变形下的力学响应。

(2)发泡硅橡胶在简单剪切的试验中,表现 出比实体橡胶更多的变形模式,即使是有限元分 析时先通过单轴压缩和简单剪切两组数据拟合 材料参数,再模拟简单剪切时,其结果与试验结 果亦不是完全吻合,两种理论模型在受限方向上 的正应力变化趋势与试验结果也不同,这些都是 由于本构关系的局限,导致材料的变形模式的 缺失。

(3)发泡硅橡胶力学响应具有典型非线性,相 比于实体橡胶,内部微结构的非线性会降低对加 载速率和环境温度的敏感性。

参考文献:

- [1] 郭辉,胡文军,陶俊林.泡沫橡胶材料的超弹性本构模型[J].计算 力学学报,2013,30(4):575-579.
- [2] 赵敏. 一种低密度微孔发泡硅橡胶及其制备方法[J]. 橡胶工业, 2017,64(12):764.
- [3] 李东锋,金利芳. 纯电动汽车电池包密封结构研究[A]. 第九届河 南省汽车工程技术研讨会论文集[C]. 郑州:河南省汽车工程学会, 2012:2-8.
- [4] 齐小宁,李和平. Mooney-Rivlin模型对发泡橡胶力学行为的模拟[J]. 橡胶工业,2003,50(1):69-72.
- [5] 史平安,符春渝,牛伟,等.多孔硅泡沫衬垫应力松弛行为的数值模 拟[J].机械工程材料,2008,32(3):82-86.
- [6] Raghunath R, Juhre D. Finite Element Simulatin of Deformation Behaviour of Cellular Rubber Components[J]. Mechanics Research Communications, 2013, 47: 32–38.
- [7] Guo Z Y, Shi X H, Chen Y, et al. Mechanical Modeling of Incompressible Particle-reinforced Neo-Hookean Composites Based on Numerical Homogenization[J]. Mechanics of Materials, 2014, 70: 1–17.
- [8] Danielsson M, Parks D M, Boyce M C. Constitutive of Model of Porous Hyperelastic Materials[J]. Mechanics of Materials, 2004, 36: 347–358.
- [9] Guo Z Y, Caner F. Mechanical Behaviour of Transversely Isotropic Porous Neo-Hookean Solids[J]. International Journal of Applied Mechanics, 2010, 2(1):11–39.
- [10] Guo Z Y, Chen Y, Peng X Q, et al. Shear Stiffness of Neo–Hookean Materials with Spherical Voids[J]. Composite Structures, 2016, 150: 21–27.
- [11] 陈玉,成斌,肖玉,等.泡沫橡胶类材料有限变形粘弹性本构模型

[J]. 橡胶工业,2017,64(4):197-201

- [12] Shan Tang, M Steven Green, Wing Kam Liu. A Renormalizaton Approach to Model Interaction in Microstructured Solids: Application to Porous Elastomer[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 217:213–225.
- [13] Michel J C, Lopez-Pamies O, Ponte Castañeda P, et al. Microscopic and Macroscopic Instabilities in Finitely Strained Porous Elastomers[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55:900–938.

收稿日期:2018-10-03

Constitutive Model and Mechanical Performance of Foamed Silicone Rubber

KE Yuchao^{1,2}, WANG Shijun¹, WU Lei¹

(1. Anhui Zhongding Sealings Co., Ltd, Ningguo 242300, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Combining the Neo-Hookean and Yeoh' s constitutive models of hyperelastic materials with the microstructures in foamed silicone rubber, the porosity of the silicone rubber was introduced to the strain energy density functions and constitutive equations as a parameter, and the prediction model for the mechanical properties of the foamed silicone rubber was established. The mechanical properties under uniaxial compression and simple shear were also investigated by using finite element method (FEM) and mechanical experiments, respectively. The results showed that the theoretic models based on the microstructure of foamed silicone rubber could well describe its mechanical response. Moreover, the effects of loading rate and environmental temperature on the mechanical properties of foamed silicone rubber were studied, which provided the guidance to its applications.

Key words: hyperelastic materials; foamed silicone rubber; constitutive model; finite element analysis; mechanical performance

•国内外动态•

蒂坦轮胎拍卖会为美国未来农民协会筹集 91 481美元 美国《现代轮胎经销商》(www. moderntiredealer.com)2019年1月23日报道:

蒂坦国际公司2018年通过举办轮胎拍卖会 (见图1)的特别方式为几家美国未来农民协会 (FFA)分会筹集91 481美元。该公司主持拍卖会 已有20多年。

2018年的轮胎拍卖会筹款资助了爱荷华州、 内布拉斯加州和佐治亚州的FFA分会。公众购买

图1 蒂坦在美国农业进步展上举办的轮胎拍卖会

数千条蒂坦和固特异品牌农业轮胎的收益有利于 他们所在州的FFA组织。

"通过蒂坦的慷慨行为,超过25 000美元筹集 款用于帮助FFA和农业教育项目,如果没有蒂坦的 支持,这些项目将无法获得资金支持",爱荷华州 FFA基金会执行董事Josh Remington说,"爱荷华 州FFA分会拥有超过15 000名会员,筹集的每一美 元都尽可能地为相关学生提供最大程度的支持, 并帮助我们消除所有财务障碍。这确保了每个学 生都能够通过农业教育培养他们卓越领导力、促 进个人成长和具备事业成功的潜力。蒂坦对爱荷 华州FFA分会的资助有助于下一代农业领导者的 成长。"

"蒂坦很荣幸地认识到FFA致力于培养未来农 业领导者的承诺",蒂坦和固特异农业轮胎农产品 经理Scott Sloan说,"轮胎拍卖会是我们回馈的方 式,我们为一家令人称道的组织筹集资金,同时种 植者有机会以较低的价格购买各种农业轮胎。"

(许亚双摘译 赵 敏校)