

考虑老化作用的废旧轮胎隔震垫的本构模型 适用性及时变规律

张广泰, 张军福, 陆东亮
(新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: 目前诸多超弹性本构模型被广泛应用于橡胶隔震支座的有限元分析, 而模型类别的选取以及对参数的拟定则是关键. 为研究不同品牌轮胎橡胶下的本构模型适用性以及老化后橡胶参数的变化规律, 选择3种不同品牌的废旧轮胎进行单轴拉伸试验, 同时选择一批轮胎进行77, 154, 231和308 h的热空气加速老化试验. 根据拟定的模型参数用ABAQUS软件对废旧轮胎隔震垫(STP)进行建模与老化后支座竖向试验进行对比. 结果表明: 3种品牌轮胎橡胶应力应变曲线均呈现典型的反“S”形曲线, 对比多种模型后确定Yeoh模型为最优. 随老化时间增加, Yeoh模型参数近似呈现单调变化. 老化前、后STP竖向刚度试验与有限元模拟值的误差均在可接受的范围内, 验证了老化参数时变规律的准确性. 本研究可以为废旧轮胎隔震垫以及其他废旧轮胎产品全寿命设计提供理论支撑.

关键词: Yeoh模型; 废旧轮胎隔震垫; 老化; 有限元分析

中图分类号: TU 352.12 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)05-0126-08

Applicability and Time Variation Law of Constitutive Model of Scrap Tire Rubber Pads Considering Aging Effect

ZHANG Guang-tai, ZHANG Jun-fu, LU Dong-liang

(School of Architecture & Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China. Corresponding author: ZHANG Guang-tai, E-mail: zgtlxh@126.com)

Abstract: At present, many hyperelastic constitutive models are widely used in the finite element analysis of rubber isolation bearings. The selection of proper constitutive models and corresponding parameter determination are crucial in this process. This study aims to investigate the applicability of various hyperelastic constitutive models for different brands of tire rubber and the variation law of rubber parameters after aging. Three different brands of waste tires were selected for uniaxial tensile tests, while a batch of tires were selected for accelerated aging tests using hot air at 77, 154, 231, and 308 h. Employing the determined model parameters, the scrap tire rubber pads (STP) were modeled and compared with vertical experiments after aging using ABAQUS software. The results show that the stress-strain curves of the rubber in all three tire brands exhibit typical reverse “S” shapes, and the Yeoh model is determined to be optimal after comparing multiple models. The Yeoh model parameters approximately show monotonic changes with increasing aging time. The errors between the STP vertical stiffness test and the finite element simulation values before and after aging are within an acceptable range, which verifies the accuracy of the time-varying law of the aging parameters. This research provides theoretical support for the whole life design of STP and other waste tire products.

Key words: Yeoh model; scrap tire rubber pads; aging; finite element analysis

由天然或合成橡胶和高强度帘线制成的废旧轮胎隔震垫(scrap tire rubber pads, STP)具有

相当大的垂直刚度和水平柔韧性,而这些特性适用于结构的隔震支座.使用对环境有很大污染的废旧轮胎作为隔震装置,非常符合中低层建筑的抗震设计理念,高效且成本低.经振动台试验验证,实施无黏结废旧轮胎隔震装置隔震后能有效降低层砌体结构的地震响应.这是很有发展前景的研究,尤其是对发展中国家^[1-4].目前,废旧轮胎作为二次原材料在土木工程领域应用广泛.STP作为一种被动隔震应用于低成本建筑中^[5].STP由Turer等^[6]提出,是从废旧轮胎胎面部位切割出的矩形多层堆叠制成的简易隔震装置.Shirai等^[7]对STP的基本力学性能进行了研究,结果表明STP的滞回曲线稳定,在不额外加入任何耗能元件前提下具备一定的耗能能力.这说明,采用STP隔震设计的结构,在不同的地震动反应下均有一定的效果.

橡胶材料很容易在复杂的环境作用下发生性质改变,长时间的老化后,橡胶材料可能会失去原有的弹性,刚度变化,最终损害橡胶隔震支座隔震的能力^[8],此时支座无法发挥原有的功能,当地震来临时对结构造成的威胁是巨大的.

对于废旧轮胎,Mishra等^[9]选取了卡车橡胶的橡胶制样,根据试验采用Mooney-Rivlin超弹性模型进行了建模,然后对整个支座进行了性能的模拟.顾浩声等^[10]通过对天然橡胶块进行切片,在加速老化后的试验基础上,建立了隔震支座的有限元模型,进而分析预测老化之后天然橡胶支座的性能.李艳敏等^[11]对老化后橡胶隔震支座的Mooney-Rivlin模型常数进行了深入研究,建立的老化后有限元模型与试验进行了对比验证.已知采用不同的本构模型以及参数,会导致建模出现很大的差异性^[12-13],甚至在某些时候出现模型不收敛等问题.现有的废旧轮胎隔震垫研究基于文献^[9]的卡车轮胎数据进行建模,对于轿车轮胎因为取样困难等原因研究较少.所以,真实有效的本构数据对废旧轮胎隔震支座研究有着重要意义.

目前,多数研究都是对单一类型天然或合成橡胶进行研究,对于不同品牌汽车废旧轮胎的本构关系及其老化后的本构变化规律研究较少.为了验证废旧轮胎隔震垫的长期老化性能,本文在对废旧轮胎老化后,进行了切片取样,进而在试验基础上,对比不同超弹性本构模型的适用性,得出不同老化时间下本构模型参数的变化规律,建立老化后支座的有限元模型,用以预测废旧轮

胎隔震垫老化后的隔震性能.

1 试验概况

1.1 试验材料及试件准备

废旧轮胎片主要分为橡胶层、帘布层及钢丝网层,其中1片轮胎包含2片钢丝网层及1层帘布层,橡胶层厚度约为1.5 mm.试验采用的废旧轮胎均为乌鲁木齐本地购买的四季胎,品牌为市面上常见的米其林、邓禄普和普利司通.同时为了避免拉伸试验时出现较大误差,尽量选取磨损和花纹一致的试件进行试验.

老化试验采用新疆宏汇建筑建材检测有限公司的101-3A型电热恒温鼓风干燥箱进行.将胎冠表面切割为400 mm×225 mm的轮胎片,试件之间需保持一定间距.对其进行编号,编号加入轮胎的编号.老化箱内部尺寸约为1 m×1 m×1 m,分为3层,用钢丝将轮胎片串起来放置在内部.在达到对应的老化时间后,分批次将试件取出,对试件编号后在常温下静置5 h,待橡胶性质稳定后制成2型哑铃试件,试件如图1所示.轿车轮胎的取样是本研究试验的难点之一,轿车轮胎胎面存在不同类型的花纹、沟壑等.因此,要得到足够大小的橡胶哑铃试件,只能从表面进行打磨,然后取出中间未曾损坏的橡胶部分进行哑铃试件的制取,为了避免误差,每一批试验选择3组试件,取平均值计算.



图1 哑铃试件拉伸前后对比

Fig. 1 Comparison of dumbbell specimens before and after stretching

1.2 老化试验原理

本试验参考《建筑隔震橡胶支座》(JG/B-118—2018)的老化性能试验方法,热空气加速基于Arrhenius方程来量化反应速率和温度的关系.选取实际温度为20 °C,老化温度为100 °C,换算公式如下:

$$t_{100} = t_{20} \times 10^{0.434 \left(\frac{E}{R} \right) \left(\frac{1}{T_{100}} - \frac{1}{T_{20}} \right)} \quad (1)$$

式中： E 为活化能，橡胶材料选为 90.4 kJ/mol； R 为气体常数，8.314 J/(mol·K)； t_{20} 为 20 °C 下的老化天数； T_{20} 为 20 °C 下的绝对温度； t_{100} 为 100 °C 下的老化天数； T_{100} 为 100 °C 下的绝对温度。

1.3 单轴拉伸试验原理

单轴拉伸试验参考《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》(GB/T528—2009). 选取经过不同热氧老化时间后的轮胎片，制成 2 型哑铃试件. 单轴拉伸试验在上海微谱检测科技集团公司完成，检测设备为万能试验机 3TM-30. 对于已经劣化的废旧轮胎材料，进行预试验后选择 50 mm/min 加载速度较为理想.

2 超弹性本构模型

轮胎橡胶属于超弹性材料，故选择超弹性本构模型进行研究. 为了得到较为实用的本构关系，对目前在有限元软件中广泛应用的几种本构模型进行适用性研究. 19 世纪以来，橡胶本构关系不断发展，大致可以分为 4 个类别：分子统计学本构模型、变形张量不变量本构模型、主伸长应变能模型和热-黏弹性本构模型. 因此本文选择应变张量不变量为基础的 Mooney-Rivlin 函数和 Yeoh 函数，采用主伸长应变能的 Ogden 函数，基于分子统计学的 Neo-Hookean 模型进行分析^[14].

2.1 基本概念

根据连续介质力学，假定本研究针对的废旧轮胎橡胶材料均为不可压缩材料，变形视为各向同性的超弹性体的均匀变形. 将弹性体的应变能分为 3 个应变不变量 I_i ($i=1, 2, 3$) 的函数. 这 3 个应变不变量可以由右 Cauchy-Green 应变张量 \mathbf{C} ，左 Cauchy-Green 应变张量 \mathbf{B} ，或主伸长率 λ (令 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 分别为 x_1, x_2, x_3 方向的主拉伸比)

确定^[15]：

$$I_1 = \text{tr} \mathbf{B} = \text{tr} \mathbf{C} = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \quad (2)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} (I_1 - \text{tr} \mathbf{B}^2) = \frac{1}{2} (I_1 - \text{tr} \mathbf{C}^2) = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2, \quad (3)$$

$$I_3 = \det \mathbf{B} = \det \mathbf{C} = \frac{1}{6} (I_1^3 - 3I_1 \text{tr} \mathbf{B}^2 + 2\text{tr} \mathbf{B}^3) = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2, \quad (4)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{F}^T \mathbf{F} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}}, \mathbf{B} = \mathbf{F} \mathbf{F}^T. \quad (5)$$

式中 \mathbf{F} 是变形梯度张量，在单轴拉伸时，

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}^T = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{\frac{1}{2}} & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

2.2 超弹性本构模型

不同形式下对应的应变能函数不同，几种模型的应变能函数的具体形式如下.

全多项式具体应变能函数形式：

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3) (\bar{I}_2 - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i}. \quad (7)$$

式中： N 为多项式阶数； J 为弹性体积比； D_i 为定义材料的压缩性， D_i 值决定材料是否可以压缩. 对于不可压缩体， J 为 1. 对于多项式，无论 N 为何值，橡胶的初始剪切模量 G ，初始体积模量 K_0 都取决于多项式一阶 ($N=1$) 系数，即 $G=2(C_{10}+C_{01})$ ， $K_0=2/D_1$.

Mooney-Rivlin 模型是多项式模型的特殊形式，当 $N=1$ 时，多项式模型缩减为 2 参数 Mooney-Rivlin 模型，2 参数模型中，当参数 C_{01} 为零时，则简化为 Neo-Hookean 模型. 而忽略了 I_2 影响的多项式取阶数 $N=3$ 时，就是典型的 3 参数 Yeoh 模型，具体的应变能函数形式如表 1 所示.

表 1 橡胶本构函数类型
Table 1 Constitutive function type of rubber

本构函数	应变能函数形式	工程应力与伸长率的关系
Neo-Hookean	$W = C_{10}(I_1 - 3)$	$\sigma = 2C_{10}(\lambda - \lambda^{-2})$
Mooney-Rivlin	$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2$	$\sigma = 2C_{10}(\lambda - \lambda^{-2}) + 2C_{01}(1 - \lambda^{-3})$
Yeoh	$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3$	$\sigma = \sum_{i=1}^N 2iC_{10}(\lambda^2 + 2\lambda^{-1} - 3)^{i-1}(\lambda - \lambda^{-2})$
Ogden	$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3)$	$\sigma = \sum_{i=1}^N \mu_i \left(\lambda^{\alpha_i - 1} + \lambda^{-\frac{1}{2}\alpha_i - 1} \right)$

3 试验结果分析

3.1 3 种品牌本构模型适用性分析

选取 3 种品牌轮胎在未老化情况下单轴拉伸试验 3 组数据的均值,得出橡胶哑铃试件拉伸的真实应力应变关系,如图 2 所示,三者均为典型的反“S”形曲线。

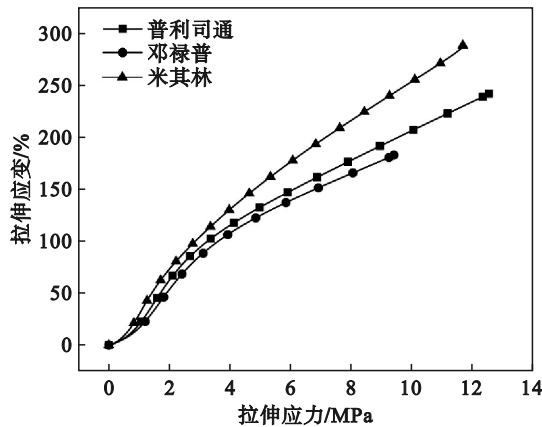


图 2 3 种品牌橡胶应力应变关系

Fig. 2 Stress-strain relationships for three brands of rubber

由图 2 可知,试件拉伸的极限应变都不大,分析原因是成品制样导致的缺陷.本样品取自废旧轿车轮胎的胎面,但因为胎面存在沟壑、凹槽等缺点,导致无法直接取出成品,需经过多次打磨,

然后制取哑铃试件.工序较为繁琐,人工打磨无法保证精度,所以样品存在缺陷,较容易拉断.但分析几种不同轮胎的本构变化趋势以及拉伸的应力应变关系,可以看出普利司通和邓禄普应力应变的关系差别并不显著,米其林曲线总体趋势也类似,同应变下应力小于其余 2 种品牌.分析原因,一是材料不同,二是由于前 2 种品牌为两批次制样,所以也造成了一定的误差.综合来看,可认为 3 种轮胎的应力应变关系大体变化趋势相近,具备相近的性质。

3.1.1 超弹性本构参数拟合

根据不同的本构模型需要采用不同的应变能函数,在单轴拉伸时得到的试验数据为加载方向上的工程应力和伸长率 $\lambda(\lambda=1+\varepsilon, \varepsilon$ 为拉伸应变).所以第一、第二应变不变量换算如下:

$$I_1 = \lambda^2 + 2\lambda^{-1}, I_2 = 2\lambda + \lambda^{-2} \quad (8)$$

将式(8)代入到不同应变能换算下的工程应力与伸长比的关系式中,可以得到不同超弹性本构模型在加载方向上工程应力与伸长率的关系,如表 1 所示。

对于单轴拉伸的模型采用 MATLAB 中的最小二乘法进行不同本构模型参数的拟合,对每个模型选取不同的阶数进行拟合,择优选择合适的模型,各模型拟合的最优结果如表 2~4 所示。

表 2 普利司通轮胎超弹性本构参数及拟合误差

Table 2 Hyperelastic constitutive parameters and fitting errors of Bridgestone tires

模型	Neo-Hookean	Mooney-Rivlin	Yeoh	Ogden
参数	$C_{10}=1.469$	$C_{10}=2.775, C_{01}=-3.42$	$C_{10}=0.6239, C_{20}=0.09681$ $C_{30}=-0.001968$	$\mu_1=0.6925, \alpha_1=3.385$
R^2	0.8424	0.9781	0.9983	0.9975

表 3 邓禄普轮胎超弹性本构参数及误差

Table 3 Hyperelastic constitutive parameters and fitting errors of Dunlop tires

模型	Neo-Hookean	Mooney-Rivlin	Yeoh	Ogden
参数	$C_{10}=1.357$	$C_{10}=2.547, C_{01}=-2.706$	$C_{10}=0.8283, C_{20}=0.05006$ $C_{30}=0.004193$	$\mu_1=0.6765, \alpha_1=3.535$
R^2	0.8605	0.9653	0.9973	0.9934

表 4 米其林轮胎超弹性本构参数及误差

Table 4 Hyperelastic constitutive parameters and fitting errors of Michelin tires

模型	Neo-Hookean	Mooney-Rivlin	Yeoh	Ogden
参数	$C_{10}=1.26$	$C_{10}=2.13, C_{01}=-2.529$	$C_{10}=0.6075, C_{20}=0.05965$ $C_{30}=-0.001166$	$\mu_1=0.7483, \alpha_1=3.057$
R^2	0.8806	0.9879	0.9997	0.9934

上述模型综合考虑了模型的拟合精度、不同阶数下模型的实用性,以及收敛性能.所以,最终

选择每种模型的合适阶数,拟合参数如表 2~4 所示.可以看出,Neo-Hookean 模型 3 种品牌下拟合

的精度均未达到0.9,Mooney-Rivlin模型的拟合决定系数比Neo-Hookean模型高,3种品牌下均达到了0.96以上,拟合情况较好.Yeoh和Ogden模型拟合在3种品牌下,精度均在0.99以上,拟合情况在试验应变范围内高度符合,效果均很理想.但Ogden模型除一阶以外均不收敛,高阶收敛性较差.

3.1.2 超弹性模型拟合对比分析

将不同的应变能函数与对应的试验数据对比,结果如图3所示.

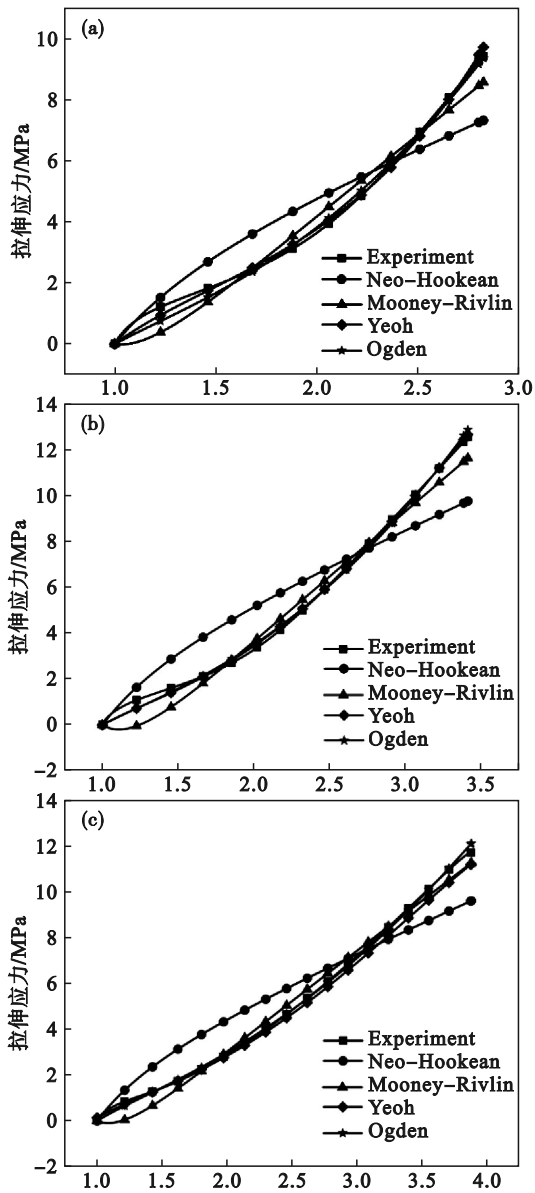


图3 不同超弹性模型和试验数据对比

Fig. 3 Comparison of different hyperelastic models and test data

(a)—邓禄普; (b)—普利司通; (c)—米其林.

可知,Neo-Hookean模型在应变较小时拟合尚可,在超过30%以后逐渐脱离试验数据,总体拟合效果较其他模型差.Mooney-Rivlin模型拟

合在应变0~80%阶段拟合偏低,且在低应变时容易出现应力负值的情况.但在80%以上的阶段,拟合效果较为理想,3种轮胎情况下方差均在0.96以上,总体而言拟合效果尚可.对于Ogden和Yeoh模型拟合效果在3种品牌轮胎下均非常理想,但采用不同的阶数展开后,高阶展开式拟合精度会略微上升,但无法保证运算收敛.综合收敛性和拟合精度对比Yeoh和Ogden模型,3种品牌下两者拟合精度均在0.993以上,拟合效果均很理想,但Ogden模型只有一阶时运算收敛,所以放弃.考虑实用性,Yeoh高阶模型运算量增加较大而拟合精度上升较少.综合选择Yeoh三阶模型为本废旧轮胎隔震产品的最优模型,后续的老化性能分析均在此模型基础上进行.

3.2 轮胎橡胶老化性能分析

轮胎橡胶在长期老化后,性能会发生改变,为了确保性能足够,本次试验研究老化时长0~100 a的轮胎橡胶性能变化,验证废旧轮胎隔震垫在建筑服役全周期内是否能保证工作性能.

为了避免产生误差,本次老化试验均选取邓禄普轮胎进行,每个老化时间段选取3组试验进行对照,选取每批次试验中值进行试验结果的分析,具体结果如图4所示.在相同应力下,老化时间增加,应变随之增加,轮胎老化后应力应变关系整体呈现下降的趋势,25~100 a老化的试件拉断伸长率逐渐下降,这说明随时间变化橡胶材料老化后确实会出现性能的下降.相较于未老化试件,在应变小于50%时,老化对应力的影响相对较小,100%应变时75 a老化应力下降约28.6%,150%应变时应力下降最大35.1%,200%应变时应力下降约37.9%.考虑到采用成品制样以及试件长时间热氧老化的情况,极限破坏应变均未超过350%.

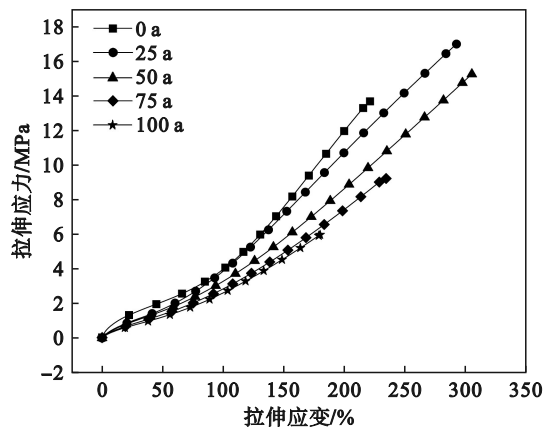


图4 邓禄普轮胎老化0~100 a应力应变关系

Fig. 4 Stress-strain relationship of Dunlop tires aging 0~100 years

对老化后的试验数据采用 MATLAB 最小二乘法进行 Yeoh 模型的参数拟合,拟合情况如表 5 所示.

表 5 老化后邓禄普轮胎超弹性本构参数
Table 5 Hyperelastic constitutive parameters of aged Dunlop tires

时间/a	0	25	50	75	100
C_{10}	0.757 5	0.687 8	0.657 4	0.557 9	0.501 4
C_{20}	0.115 40	0.109 30	0.078 34	0.069 45	0.065 04
C_{30}	-0.001 764	-0.001 933	-0.001 637	-0.001 504	-0.001 097
R^2	0.997 1	0.999 4	0.999 8	0.999 8	0.999 4

可以看出,随老化时间的增加,橡胶的 Yeoh 模型参数总体随应力应变关系的变化呈现逐渐下降的趋势.对于老化后的哑铃试件, Yeoh 模型同样具备很高的拟合精度.

为了分析不同参数对于橡胶哑铃试件单轴拉伸的影响,采用 ABAQUS 建立单轴拉伸的哑铃试件模型,通过控制变量,以现有本构 Yeoh 模型的参数数据,进行对应的试验模拟,分析不同参数的变化对于橡胶哑铃试件的影响.建模对应真实的 2 型哑铃试件,两侧一端固定,一端耦合至端点处施加拉伸应力,网格单元类型选用 C3D8H,建模如图 5 所示.

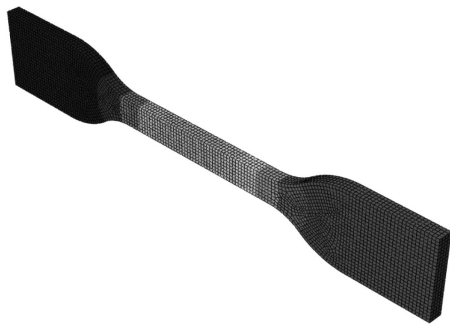


图 5 2 型哑铃试件建模图

Fig. 5 Modelling diagram of type 2 dumbbell specimen

为了分析不同的 Yeoh 参数对于橡胶拉伸应力应变关系的影响,分别控制 3 参数绝对值递减变化: C_{10} 为 0.750 至 0.500, C_{20} 为 0.22 至 0.04, C_{30} 为 -0.002 4 至 -0.000 6. 分别将 C_{10} , C_{20} , C_{30} 变化下的模拟单轴拉伸试验的应力应变关系绘制如图 6~图 8 所示.可以看出改变本构参数在不同的应变范围内,影响变化也不同.随着 C_{10} , C_{20} 的依次递减,如图 6 和图 7 所示,相同应变下应力近似呈现线性递减的规律.但在 C_{20} 减小至 0.04 时,数值运算量增加,应力变化加剧,数值减少至 0.02 时,运算至同等应变无法收敛. C_{30} 由于是负值且数值较小,可以看出在选择的参数变化区间内,100%

应变以下时应力应变关系相近.同等应变下,随 C_{30} 的增大,应力值逐渐增加,增幅近似线性变化,但变化也不显著.综上,对参数的建模分析可知,在一定范围内所选本构参数单调变化时,对应的应力应变关系也近似呈现单调变化.所以,拟合 0~100 a 的本构参数,以时间 t 为变量,对参数的变化规律进行拟合,结果如图 9 所示.

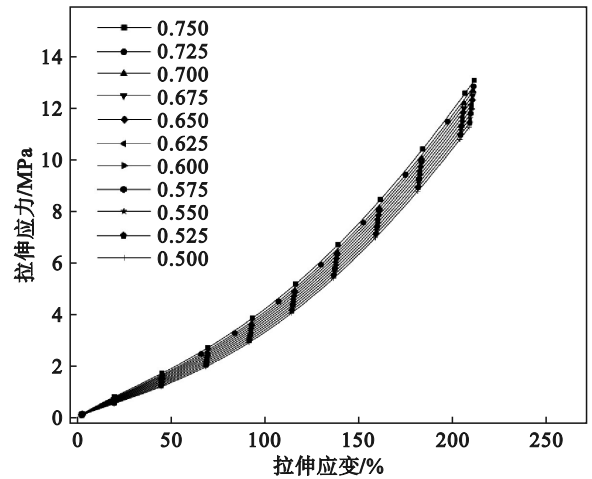


图 6 C_{10} 递减对应的应力应变关系

Fig. 6 Corresponding stress-strain relationship with decreasing C_{10}

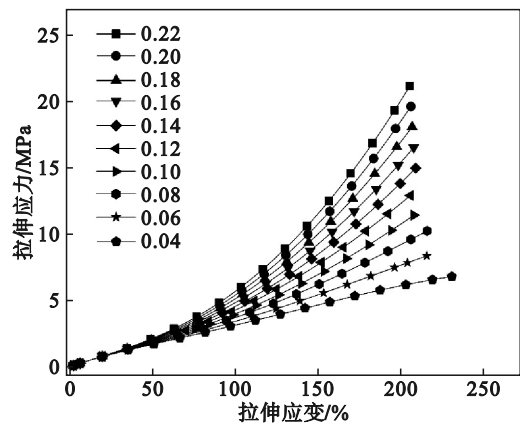


图 7 C_{20} 递减对应的应力应变关系

Fig. 7 Corresponding stress-strain relationship with decreasing C_{20}

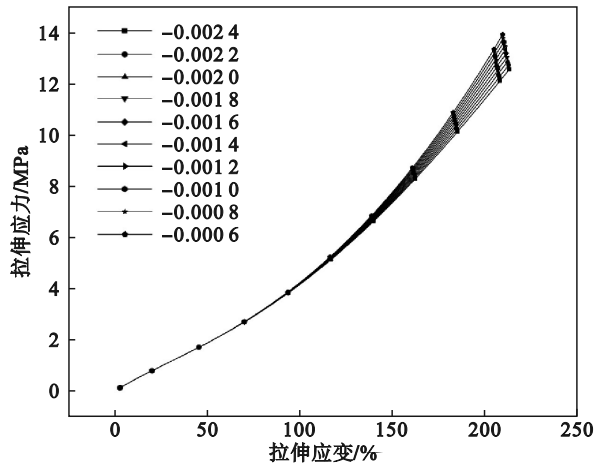


图 8 C_{30} 递减对应的应力应变关系

Fig. 8 Corresponding stress-strain relationship with decreasing C_{30}

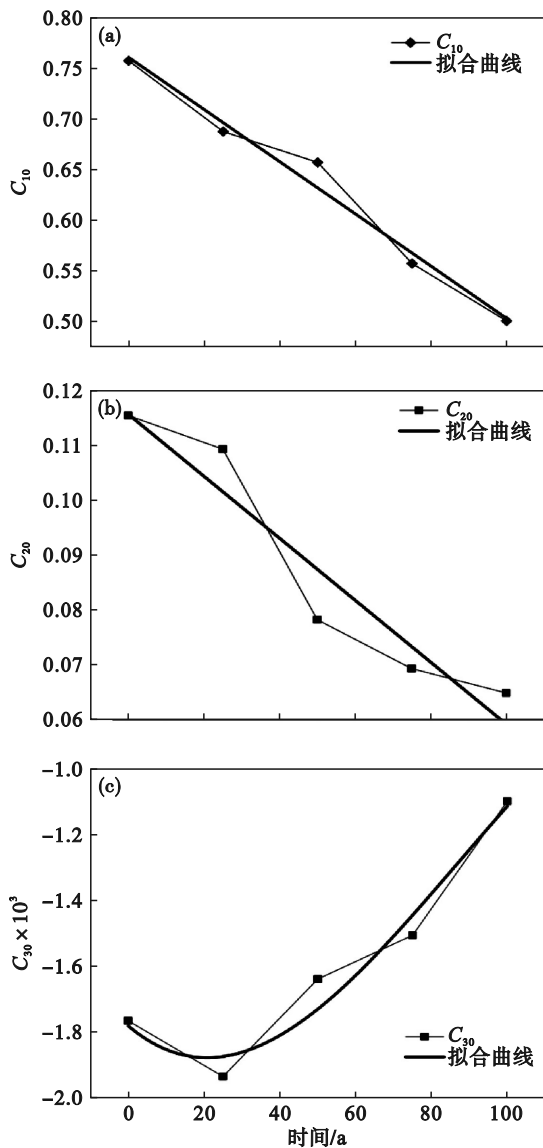


图 9 Yeoh 本构参数随时间变化拟合对比

Fig. 9 Comparison of Yeoh constitutive parameters fitting with time

可以看出, 3 参数在大致趋势上呈现一致性. 由上述有限元分析可知, 在参数单调变化时, 对应的单轴拉伸应力应变关系也近似单调变化. 由图 9 可知, 在 25 a 老化时, 参数相较于其他时期存在一定偏差, 分析其原因可能是制样时导致的误差. 由于是成品制样, 2 次打磨导致误差的产生, 当试件需要打磨或者调整厚度时, 结果也可能受影响, 这一点与规范一致. 综上所述, 拟合废旧轮胎 Yeoh 模型在老化情况下, 本构参数时变规律如式(9)所示:

$$\left. \begin{aligned} C_{10} &= 0.7609 - 2.57e^{-3} \times t, \\ C_{20} &= 0.11562 - 5.6228e^{-4} \times t, \\ C_{30} &= -0.00178 - 9.72619e^{-6} \times t + \\ &\quad 2.65829e^{-7} \times t^2 - 1.01867e^{-9} \times t^3. \end{aligned} \right\} (9)$$

4 隔震支座有限元建模

4.1 支座建模

采用式(9)的超弹性本构参数, 分别进行 0~100 a 5 个支座的建模. 此处, 选取 STP 层数为 6 层, 将钢丝网等效为 0.1 mm 厚的钢板, 橡胶每层厚度等效为 11.5 mm, 支座高度为 69 mm. 选择橡胶层网格单元为 C3D8H, 钢丝网层网格单元为 C3D8R, 在隔震垫上、下建立刚体加载板, 模拟真实试验状况. 具体建模如图 10 所示.

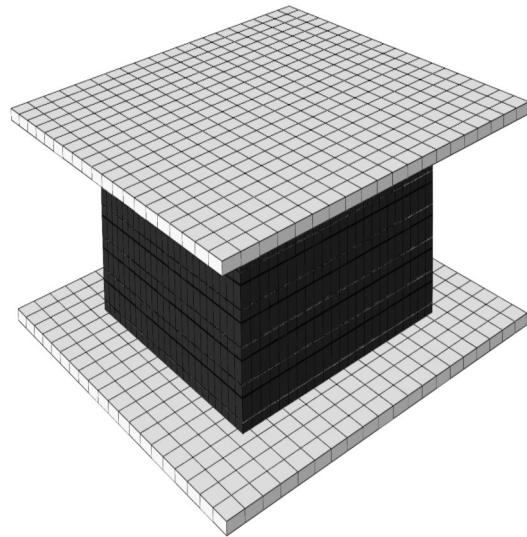


图 10 废旧轮胎隔震垫建模图

Fig. 10 Scrap tire rubber pads modelling diagram

4.2 建模结果分析

采用作者团队前期老化后 STP 竖向试验共计 15 个支座的数据, 以每个老化时间下 3 个支座的竖向刚度均值对比验证建模规律的准确性. 竖

向刚度模拟值总体和单轴拉伸的模拟值呈现一致性,随老化时间增加呈现下降趋势,25~100 a老化下竖向刚度下降幅值为19.3%,试验数据25~100 a支座竖向刚度下降幅值为3.4%。在25,50,75及100 a老化下竖向刚度和试验值模拟差异分别为1.8%,3.4%,8.4%和15%,可以看出25~75 a老化下竖向刚度差值并不显著。总体趋势分析,随本构时变规律的影响,建模竖向刚度呈现下降的趋势。而试验数据在25~100 a也呈现下降的趋势,验证了式(9)的准确性。竖向刚度试验值和模拟值如图11所示。

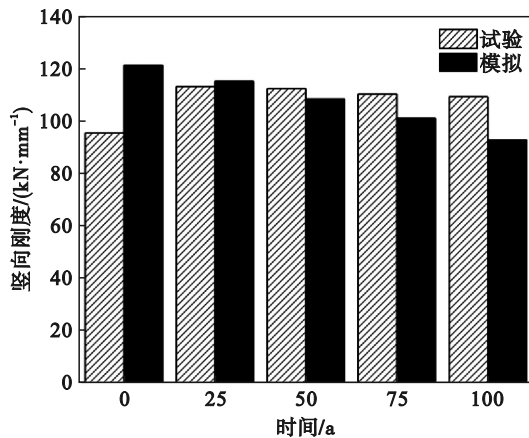


图11 6 MPa下竖向刚度试验值与模拟值

Fig. 11 Test and simulation values of vertical stiffness at 6 MPa

4.3 误差分析

1) 本文拟合老化Yeoh模型参数是根据单轴拉伸试验计算并拟合而成的,试验本身存在一定误差。

2) 废旧轮胎本身就具备很大的离散性,其胎面存在的花纹、沟壑等导致试验的位移值较大。而建模无法完全复现这一部分,也会导致误差的产生。

3) 只考虑橡胶的老化,而对于轮胎内部的钢丝网和帘布等的老化未考虑,也会导致部分误差的产生。

5 结 论

1) 对比3种品牌下废旧轮胎超弹性本构拟合,选择Yeoh模型为最佳模型。

2) 随老化时间的增加,轮胎Yeoh模型本构3参数绝对值均呈现下降趋势。

3) 将时变规律代入有限元模拟与试验数据吻合较好,证明所建立的本构模型有效。

4) 得出的废旧轿车轮胎本构及Yeoh模型参

数老化时变规律可为废旧轮胎隔震垫以及其他废旧轮胎产品全寿命设计提供理论支持。

参考文献:

- [1] Zisan M B, Igarashi A. Lateral load performance and seismic demand of unbonded scrap tire rubber pad base isolators [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2021, 20(3): 803-821.
- [2] Raj J C J, Kumar M V. Performance evaluation of eco-friendly scrap tyre base isolation technology in distinct construction quality RC framed buildings located in seismic risk zone [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 53: 102511.
- [3] Wang M Y, Zhang G T. A low-cost isolator of scrap tire pads in rural construction: evaluation of the mechanical properties and numerical assessment of the response control effects [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 67: 105996.
- [4] Basar T, Deb S K, Das P J, et al. Seismic response control of low-rise unreinforced masonry building test model using low-cost and sustainable un-bonded scrap tyre isolator (U-STI) [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 142: 106561.
- [5] Lamour M, Cecchin A. Repurposed materials in construction: a review of low-processed scrap tires in civil engineering applications for disaster risk reduction [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 293: 123368.
- [6] Turer A, Özden B. Seismic base isolation using low-cost scrap tire pads (STP) [J]. *Materials and Structures*, 2008, 41: 891-908.
- [7] Shirai K, Park J. Use of scrap tire pads in vibration control system for seismic response reduction of buildings [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2020, 18(5): 2497-2521.
- [8] Calabrese A, Losanno D, Barjani A, et al. Effects of the long-term aging of glass-fiber reinforced bearings (FRBs) on the seismic response of a base-isolated residential building [J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 110735.
- [9] Mishra H K, Igarashi A, Matsushima H. Finite element analysis and experimental verification of the scrap tire rubber pad isolator [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2013, 11: 687-707.
- [10] 顾浩声,伊藤義人.老化后天然橡胶隔震支座的性能预测 [J].北京工业大学学报,2012,38(10):1515-1521. (Gu Hao-sheng, Itoh Yoshito. Prediction of aged natural rubber isolation bearings' performances [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2012, 38(10): 1515-1521.)
- [11] 李艳敏,马玉宏,罗佳润,等.考虑老化时间影响的隔震支座橡胶本构 Moony-Rivlin 模型常数研究 [J].振动与冲击, 2016, 35(16): 164-169. (Li Yan-min, Ma Yu-hong, Luo Jia-run, et al. The effect of aging on the material constant of the rubber isolator's constitutive model Mooney-Rivlin [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(16): 164-169.)
- [12] Gajewski M D, Miecznikowski M. Assessment of the suitability of elastomeric bearings modeling using the hyperelasticity and the finite element method [J]. *Materials*, 2021, 14(24): 7665.
- [13] Kim B, Lee S B, Lee J, et al. A comparison among Neo-Hookean model, Mooney-Rivlin model, and Ogden model for chloroprene rubber [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13: 759-764.

(下转第152页)