

载重子午线轮胎滚动阻力的热力耦合分析及试验验证

李 昭^{1,2}, 韩冬礼¹, 朱华健¹, 李国瑞², 卢咏来¹, 李凡珠^{1*}

(1. 北京化工大学 有机无机复合材料国家重点实验室, 北京 100029; 2. 风神轮胎股份有限公司, 河南 焦作 454003)

摘要:研究全钢载重子午线轮胎滚动阻力的高精度有限元仿真分析方法。首先结合所要求的工况条件, 建立轮胎可靠的有限元仿真模型; 其次建立轮胎滚动阻力分析方法, 着重分析傅里叶级数高精度的拟合以及胶料的非线性粘弹性本构方程的建立; 最后通过测力法完成轮胎滚动阻力的试验测试, 将仿真结果与之对比, 验证所建立的轮胎滚动阻力分析方法有效。

关键词:全钢载重子午线轮胎; 滚动阻力; 有限元仿真; 非线性粘弹性; 傅里叶级数; 热力耦合

中图分类号:U463.341⁺.3; O241.82

文章编号:1000-890X(2019)10-0730-09

文献标志码:A

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2019.10.0730

我国汽车工业的迅速成长带动了轮胎产业的迅猛发展, 目前我国已成为轮胎的生产以及消费大国^[1]。随着人们对汽车舒适性、安全性以及节能环保性等方面的要求不断提高, 对轮胎性能的要求也相应提升。开发低滚动阻力的高性能节油轮胎在橡胶以及轮胎领域均是一件重要且急迫的工作^[2-3]。汽车在行驶过程中遇到的阻力有多种形式, 包含空气阻力、轮胎滚动阻力、传动系统阻力、加速阻力以及爬坡阻力等^[4]。在汽车总阻力中, 轮胎滚动阻力占比20%~30%^[5-6]。滚动阻力又可称为轮胎的迟滞能量损耗, 这种能量损耗是由不断循环的应力-应变造成的, 具体成因有: (1) 由于应力的作用, 使得轮胎在与路面接触时发生反复变形, 从而产生粘弹性能量损失; (2) 轮胎与路面以及轮辋接触时产生摩擦, 从而产生摩擦阻力; (3) 轮胎在滚动时受到空气阻力作用^[7-8]。对轮胎滚动阻力贡献最大的是由轮胎变形产生的能量损失, 其占比约为80%; 剩余的20%轮胎滚动阻力由空气阻力和轮胎-路面和轮胎-轮辋摩擦造成。研究^[8]

表明, 轮胎滚动阻力若降低15%~30%, 燃料用量可减小3%~6%, 如此不仅能够减少油耗, 还可以减少汽车尾气排放, 达到节能减排的效果。

大量研究^[9-11]通过调控胎面胶用橡胶的微观结构和优化轮胎的生产工艺来降低轮胎在指定工况下的滞后损耗因子, 从而提高轮胎的燃油效率, 降低滚动阻力和动态温升。然而这些试验方法可能存在耗时长、成本高、多因素影响相互耦合等不足。数值仿真方法, 尤其是有限元分析法因其研发周期短以及成本低的优势在轮胎的早期设计中深受关注^[12-13]。S. Ghosh等^[14]基于有限元的计算方法, 探究了胎面胶中加入微纳混合填料的乘用车轮胎滚动阻力的变化情况, 研究结果表明在胎面胶中添加双相填料能够降低轮胎滚动阻力。K. Yokota等^[15]将轮胎和环境的热交换作为一个重要影响因素来研究轮胎的滚动阻力和温度场分布。T. G. Ebbott等^[16]基于S. Futamura^[17]提出的变形指数, 通过非迭代计算方法得到了充气轮胎稳态温度分布, 极大地简化了基于完全耦合的迭代算法的动态温升计算方法。J. R. Cho等^[18]预测了三维含花纹块的充气轮胎温度分布图、滚动阻力以及轮胎各部件对于整体功率损耗的贡献率。J. Ejsmont等^[19]通过试验研究温度(轮胎自身温度、路面温度和空气温度)

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1502501); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(ZY1911)

作者简介:李昭(1981—), 男, 河南焦作人, 北京化工大学博士研究生, 主要从事轮胎的设计和仿真分析。

*通信联系人(lifanzhu2013@163.com)

对于轮胎滚动阻力的影响,指出因胶料的热力耦合特性使得轮胎滞后温升和滚动阻力的仿真分析存在一定难度。M. Johlitz等^[20]基于前人获得的胶料参数在开源有限元软件Pandas上二次开发了胶料热力耦合算法,该算法可预测不同温度下胶料的力学松弛行为和滞后温升,但后者计算非常耗时,且目前仅停留在定性描述上。H. Aldhufairi等^[21]指出开发低滞后温升胶料的重要性,并从轮胎结构布局、尺寸设计和胶料配方3个方面总结了设计低滚动阻力轮胎的研究进展,指出轮胎滚动阻力计算的难度及仿真分析方法的重要性。

本研究以12R22.5 18PR全钢载重子午线轮胎作为研究对象,首先结合所要求的工况条件,完成轮胎可靠的有限元仿真模型的建立;其次基于非线性粘弹性理论建立轮胎滚动阻力分析方法;最后通过试验测试结果进行对比分析,验证所建立的轮胎滚动阻力分析方法的有效性。

1 胶料与轮胎的测试

1.1 胶料的应力-应变曲线

以胎面胶为例,在5个应变水平下对试样(长条)进行循环往复测试,以便去除Mullins效应。加载和卸载速率相同,均为 $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,其中卸载时应至接近零的应力状态后再转为加载条件,即加载最大状态由位移控制,卸载最大状态由力值控制。5个应变条件分别为:20%,40%,80%,120%和200%。试样测试区初始长度为50 mm,因此循环往复拉伸测试的最大位移分别是10,20,40,60,100 mm,见图1。取最大位移加载条件下的最后一周加载段曲线作为该胶料加载的稳定曲线,并将其转为应力-应变曲线。

1.2 胶料的动态力学性能

胶料的储能模量、损耗模量和滞后损耗因子与应变和温度的依赖性关系由美国阿尔法科技有限公司生产的RPA2000橡胶加工分析仪测试而得,主要对胶料进行不同温度下的应变扫描,应变扫描条件为:频率 10 Hz,应变范围 0.2%~100%,温度 30~120 °C,间隔温度 30 °C。

1.3 轮胎的滚动阻力

轮胎滚动阻力测试采用测力法(测试轮胎轴

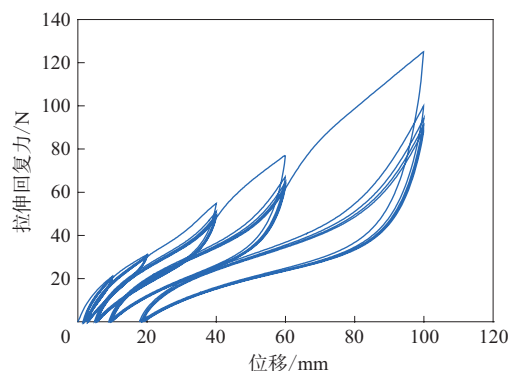


图1 胎面胶的拉伸回复力-位移曲线

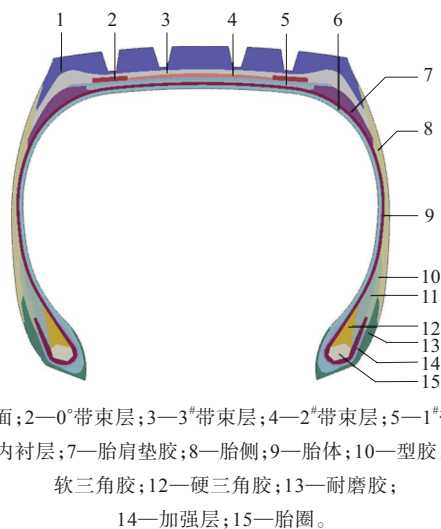
上的反作用力)进行,得出单位行驶里程的能量损失 F_r 和滚动阻力系数 C_r (滚动阻力与轮胎负荷的比值)。试验采用允许轮胎气压在运行升温过程中增大的封闭式充气方法。运用分离法测量出轮胎的附加损失。试验室标准环境温度为 $(25 \pm 1) \text{ }^{\circ}\text{C}$,轮胎在该温度环境中至少放置6 h。

2 轮胎有限元模型的建立

有限元模型分析分为前处理、计算求解、后处理3个部分。有限元模型的建立主要完成前处理设置,即几何模型建立、网格划分、材料模型确定和边界条件设定。

2.1 几何模型的建立和网格划分

为了得到真实的轮胎模型,在建立几何模型前,先对轮胎断面进行测绘,然后在AutoCAD中对得到的断面图像进行几何处理得到轮胎的材料分布,如图2所示。本研究所选用的轮胎为纵



1—胎面;2—0°带束层;3—3°带束层;4—2°带束层;5—1°带束层;
6—内衬层;7—胎肩垫胶;8—胎侧;9—胎体;10—型胶;11—
软三角胶;12—硬三角胶;13—耐磨胶;
14—加强层;15—胎圈。

图2 12R22.5 18PR轮胎结构及材料分布示意

向花纹沟轮胎,其同时具有轴对称性和旋转对称性,故其几何模型建立相对简便。采用CGAX3H和CGAX4H单元模拟轮胎中胶料部分,采用SFMGAX1单元模拟作为加强骨架结构的帘线部分。

对于轮胎滚动阻力的仿真分析,需要建立3D轮胎有限元模型。而若需要建立3D轮胎有限元模型,需要用*Symmetric Generation关键字将二维模型围绕轮胎中心线旋转360°,添加路面和路面节点,并定义相互之间的接触关系。图3展示了本研究轮胎在转鼓上测试滚动阻力的3D有限元模型。计算接地印痕等轮胎的静特性参数时,只需将转鼓改为平路面即可。

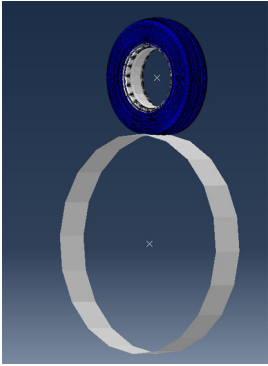


图3 轮胎和轮辋以及转鼓的3D有限元模型

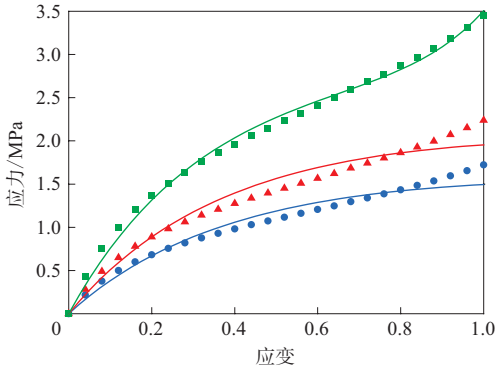
2.2 材料模型的建立

如图2所示,12R22.5 18PR轮胎由15个部件组成,涵盖9种胶料和6种钢丝帘线骨架材料。胶料的超弹性本构方程及其参数的确定至关重要,这是获得可靠的仿真计算结果的关键。通过试验可以获取胶料单轴拉伸条件下的应力-应变曲线。基于各向同性线弹性的理论推导,将胶料的单轴拉伸应力-应变数据分别乘以因数1.3和2.0,可以

得到其平面拉伸和等双轴拉伸应力-应变曲线^[22],如图4所示。然后通过单轴拉伸、平面拉伸和等双轴拉伸组合的应力-应变数据拟合得到胶料的三阶Ogden超弹性本构方程的相关材料参数。胶料的三阶Ogden超弹性本构方程如下:

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

式中, W 是应变能密度, $\bar{\lambda}_i$ ($i=1,2,3$)是拉伸比, μ_i 和 α_i ($i=1,2,3$)是材料参数。



点●,▲和■分别为单轴拉伸、平面拉伸和等双轴拉伸试验数据;蓝色、红色和绿色曲线分别为单轴拉伸、平面拉伸和等双轴拉伸三阶Ogden超弹性本构方程拟合曲线。

图4 胎面胶单轴拉伸、平面拉伸和等双轴拉伸应力-应变曲线

同样的方法可以获取其余8种胶料的应力-应变曲线以及三阶Ogden超弹性本构方程的材料参数。表1列出了相应胶料三阶Ogden超弹性本构方程的胶料参数。

确定完胶料的超弹性本构方程和材料参数后,需要确定轮胎的骨架材料,即钢丝帘线的材料参数。橡胶-钢丝帘线复合材料的几何特性参数由Rebar材料模型确定。该模型可有效地模拟橡胶-钢

表1 12R22.5 18PR轮胎各部件胶料的三阶Ogden超弹性本构方程的材料参数

序号	部件	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3
1	胎体和带束层	2.11	2.86×10^{-2}	5.12×10^{-5}	17.77	1.67×10^{-4}	-7.42
2	型胶和加强层	5.48	0.71	-3.65	1.01	9.51×10^{-4}	-6.30
3	软三角胶	-18.38	0.92	9.19	1.45	9.83	0.40
4	硬三角胶	3.72	-1.57×10^{-2}	3.91×10^{-2}	10.42	2.82×10^{-2}	-4.73
5	胎侧	3.17	0.67	-2.17	0.95	6.73×10^{-4}	-5.92
6	耐磨胶	2.59	3.72×10^{-2}	7.88×10^{-4}	15.10	9.29×10^{-4}	-6.79
7	胎面基部胶和胎肩垫胶	1.31	6.86×10^{-3}	4.25×10^{-3}	9.89	6.60×10^{-3}	-3.91
8	胎面	4.59	0.70	-3.12	0.97	4.50×10^{-4}	-6.78
9	内衬层	3.67	1.31	-3.12	1.55	3.89×10^{-5}	-7.82

丝帘线复合材料的材料和几何非线性。分析中可利用*Rebar Layer关键字定义帘线排布距离(mm)、钢丝帘线截面积(mm²)和取向方向[°]。表2给出了12R22.5 18PR轮胎骨架材料的几何特性参数。

表2 12R22.5 18PR轮胎骨架材料的几何特性参数

序号	部件	帘线排布距离/mm	钢丝帘线截面积/mm ²	取向方向/°
1	胎体	1.43	0.456 2	0
2	加强层	2.22	0.456 2	60
3	0°带束层	1.82	0.659 7	90
4	1°带束层	1.82	0.671 5	66
5	2°带束层	1.82	0.671 5	75
6	3°带束层	2.50	0.353 4	105

2.3 边界条件的设立

本研究轮胎的额定充气压力为930 kPa;单胎额定负荷为3 550 kg;负荷为单胎额定负荷的85%,即 $3\,550\text{ kg} \times 9.81\text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \times 85\% \div 1\,000 = 29.602\text{ kN}$;转速设定为 $80\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;转鼓附着因数设定为0.7。边界条件中,需要基于轮胎自由滚动状态的模拟,计算自由滚动角速度。对滚动轮胎而言,其自由滚动是指作用在轮胎与路面间的驱动力为零。根据制动驱动工况下轮胎纵向力与滚动角速度的关系曲线(见图5),可知轮胎自由滚动角速度为 $42.140\,2\text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

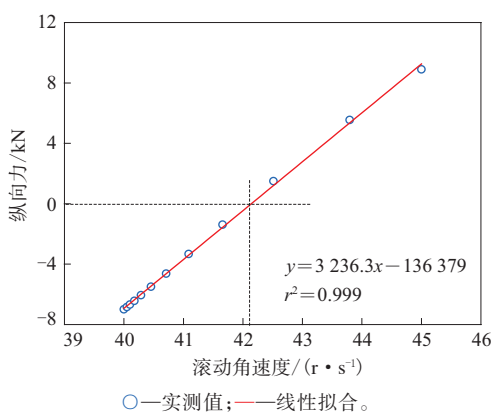


图5 制动驱动工况下轮胎纵向力与滚动角速度的关系曲线

3 轮胎滚动阻力的仿真分析方法

3.1 数值计算方法

轮胎滚动阻力实质上由轮胎材料的弹性迟滞损耗造成。根据力平衡原理有:

$$P_z = R_z, F_R = T \quad (2)$$

式中, P_z 为轮胎所受的负荷, R_z 为地面对轮胎的法向反作用力, F_R 为地面对轮胎的切向反作用力(表征滚动阻力), T 为施加在轴上的推力,且

$$F_R \cdot r - R_z \cdot a = 0 \quad (3)$$

$$F_R = R_z \cdot \frac{a}{r} \quad (4)$$

式中, r 为轮胎滚动半径, a 为 R_z 与轮胎中心的偏心距。

为了反映滚动阻力的能量损耗本质,将式(4)进行如下变形:

$$F_R = R_z \cdot \frac{a}{r} = \frac{aR_z \times 2\pi}{r \times 2\pi} = \frac{E_l}{C} = \frac{\sum V_j Q_j}{C} \quad (5)$$

式中, E_l 为轮胎滚动一周的能量损耗, C 为轮胎滚动一周的距离, V_j 为轮胎中胶料的单位体积, Q_j 为胶料单位体积内的能量耗散量。

轮胎滚动一周的能量损耗可以通过如下步骤计算:首先计算轮胎的二维轴对称截面单元滚动一个周期的应力-应变循环数据,这可以通过提取二维轴对称截面单元所对应的三维有限元轮胎模型单元上的周向应力-应变分布数据获取。但有两个问题需要解决,一是三维轮胎必须处于稳态自由滚动工况下;二是轮胎滚动一周所对应的典型的等效应力-等效应变的循环数据是非谐变的。将应力-应变循环一周的数据通过傅里叶正弦级数分解成谐波的叠加来获得不同频率下的应力-应变幅值,如式(6)和(7)所示:

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_0 + \sum_{i=1}^m \bar{\varepsilon}_{a,i} \sin\left(\frac{i}{2} \cdot \omega t\right) \quad (6)$$

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_0 + \sum_{i=1}^m \bar{\sigma}_{a,i} \sin\left(\frac{i}{2} \cdot \omega t + \delta_i\right) \quad (7)$$

式中, $\bar{\varepsilon}$ 为实时应变; $\bar{\sigma}$ 为实时应力; $\bar{\varepsilon}_0$ 为应变均值; $\bar{\sigma}_0$ 为应力均值; $\bar{\varepsilon}_{a,i}$ 为第*i*阶的应变幅值; $\bar{\sigma}_{a,i}$ 为第*i*阶的应力幅值;*i*为计数器;*m*为傅里叶正弦级数展开的项次,本工作为保证计算的精度,*m*取值为50; ω 为角频率;*t*为时间; δ_i 为第*i*阶的应力与应变间的相位角。可得:

$$Q_j = \sum_{i=1}^m \left(\frac{k\pi}{2} \cdot \bar{\sigma}_{a,i} \cdot \bar{\varepsilon}_{a,i} \sin \delta_i \right) \quad (8)$$

式中, $\sin \delta_i$ 是滞后损耗因子,可通过RPA2000橡胶加工分析仪测试而得。

根据式(8)可求得 F_R :

$$F_R = \frac{\sum_{j=1}^N \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{k\pi}{2} \cdot \bar{\sigma}_{a,i} \cdot \bar{\varepsilon}_{a,i} \sin \delta_i \right) \cdot V_j \right]}{r \times 2\pi} \quad (9)$$

式中, N 为总单元数量。

3.2 计算流程

总结的12R22.5 18PR轮胎滚动阻力求解流程如图6所示,主要分为变形分析、能量耗散分析和热传递分析3个模块。为说明此轮胎滚动阻力计算方法的精确性和可靠性,在此特别阐述傅里叶

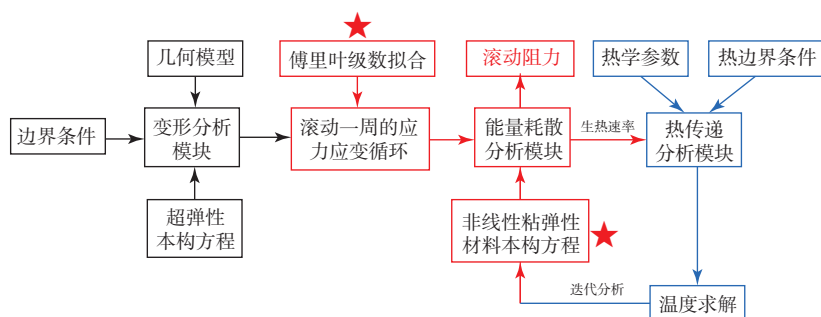


图6 12R22.5 18PR轮胎滚动阻力求解流程

正弦级数高精度的拟合和非线性粘弹性本构方程的建立。

3.3 傅里叶正弦级数高精度的拟合

傅里叶正弦级数可以将轮胎不同部位具有非简谐特性的应变循环历史数据转为具有简谐特性的循环加载波的叠加。为实现其高精度的拟合效果,特别选用50阶傅里叶正弦级数。图7选出了该轮胎10个部位的代表单元,数字为该单元的编号,可用NOEL表示。10个代表单元编号和所处部位分别是:301(加强层)、412(硬三角胶)、542(软三角胶)、872(胎体)、911(胎肩垫胶)、1115(内衬层)、1860(胎面)、1910(带束层)、2054(耐磨胶)、2192(胎侧)。选取不同部位的单元是为了更加全面地验证50阶傅里叶正弦级数对于非简谐特性的

应变循环历史数据高精度拟合的有效性。

轮胎10个部位代表单元上的等效应变循环历史数据与傅里叶正弦级数的拟合数据如图8—17所示(θ 为测试角)。通过对比可知,50阶傅里叶正弦级数可以有效地用于实现非简谐特性的应变循环历史数据高精度的拟合。

3.4 非线性粘弹性本构方程的建立

在保证傅里叶正弦级数的拟合精度后,另一个核心问题是各部位胶料的非线性粘弹性本构方程的确定。为了保证滚动阻力的计算精度,需要建立式(9)中滞后损耗因子与温度和应变的函数关系。拟采用Ulmer修正的Kraus模型分别建立储能模量和损耗模量与应变之间的函数关系,然后通过线性插值法将Kraus模型中的材料参数分别与

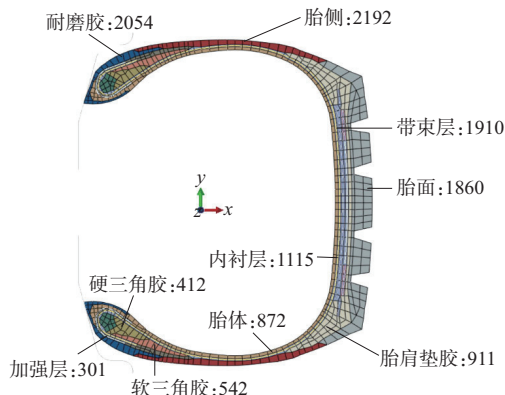


图7 轮胎不同部位等效应变循环历史数据提取位置对应的单元分布

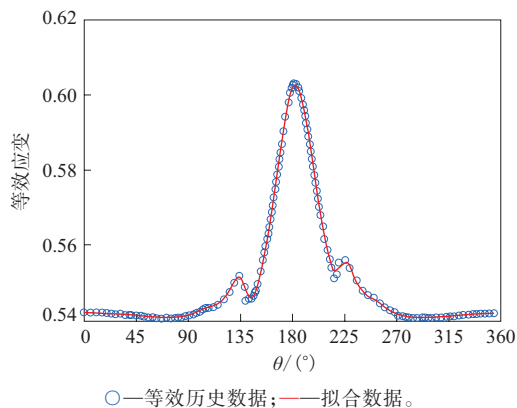
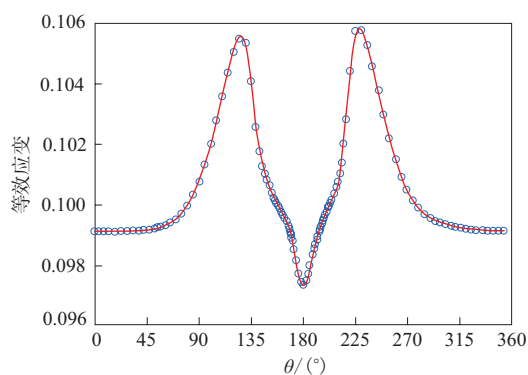
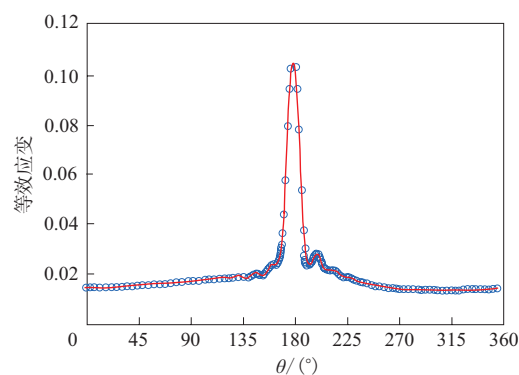


图8 加强层代表单元的等效应变循环历史数据及傅里叶正弦级数拟合数据



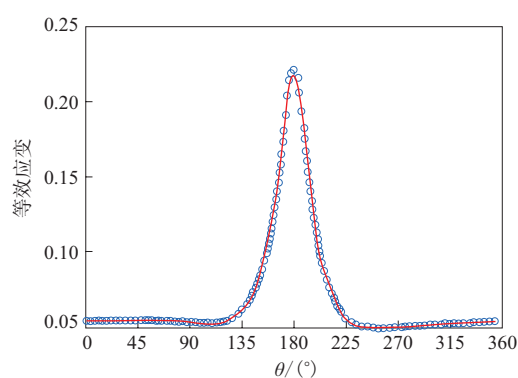
注同图8。

图9 硬三角胶代表单元的等效应变循环历史数据及傅里叶正弦级数拟合数据



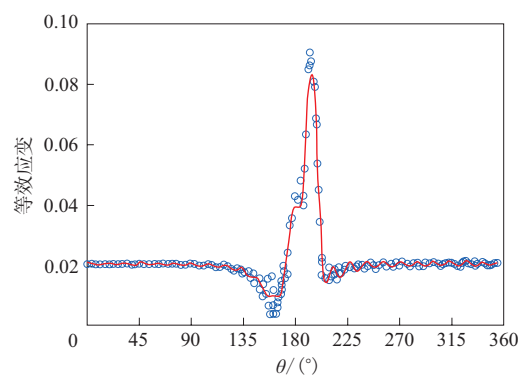
注同图8。

图12 胎肩垫胶代表单元的等效应变循环历史数据及傅里叶正弦级数拟合数据



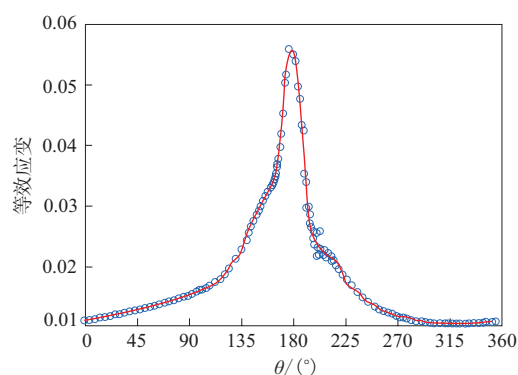
注同图8。

图10 软三角胶代表单元的等效应变循环历史数据及傅里叶正弦级数拟合数据



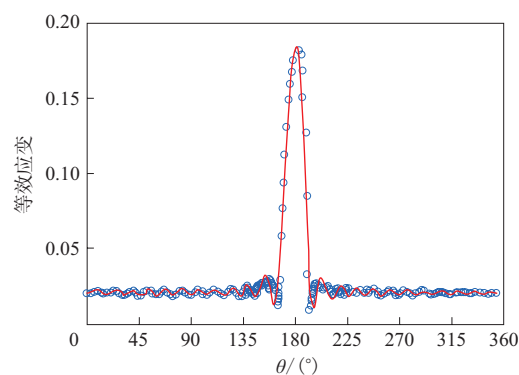
注同图8。

图13 内衬层代表单元的等效应变循环历史数据及傅里叶正弦级数拟合数据



注同图8。

图11 胎体代表单元的等效应变循环历史数据及傅里叶正弦级数拟合数据



注同图8。

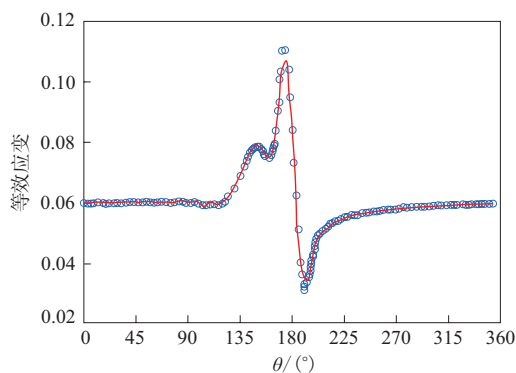
图14 胎面代表单元的等效应变循环历史数据及傅里叶正弦级数拟合数据

温度建立定量联系。Ulmer修正的Kraus模型如式

(10)和(11)所示[$G'(\gamma)$ 为储能模量, $G''(\gamma)$ 为损耗模量, γ 为应变]。

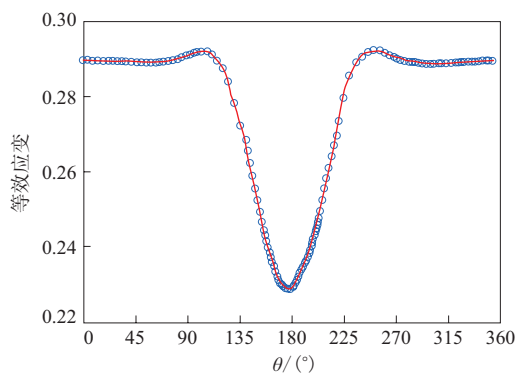
$$G'(\gamma) = G'_\infty + \frac{\Delta G'}{1 + (\gamma/\gamma'_c)^{2m'}} \quad (10)$$

$$G''(\gamma) = G''_\infty + \frac{\Delta G'' \cdot \gamma^{m''}}{1 + (\gamma/\gamma''_c)^{2m''}} + G''_2 e^{-\gamma/\gamma_2} \quad (11)$$



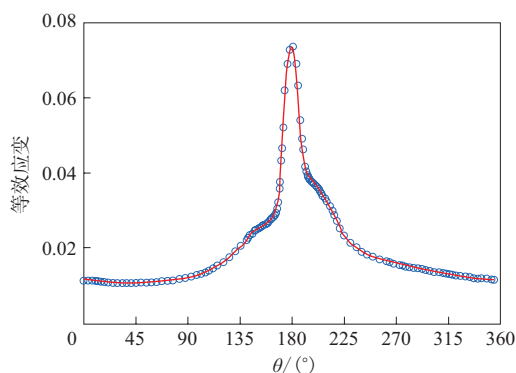
注同图8。

图15 带束层代表单元的等效应变循环历史数据及傅里叶正弦级数拟合数据



注同图8。

图16 耐磨胶代表单元的等效应变循环历史数据及傅里叶正弦级数拟合数据



注同图8。

图17 胎侧代表单元的等效应变循环历史数据及傅里叶正弦级数拟合数据

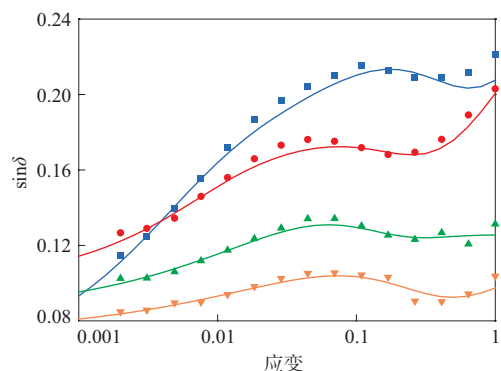
$$G^*(\gamma) = \sqrt{[G'(\gamma)]^2 + [G''(\gamma)]^2} \quad (12)$$

$$\sin \delta(\gamma) = \frac{G''(\gamma)}{G^*(\gamma)} \quad (13)$$

式中, G'_∞ , $\Delta G'$, γ'_c , m' , G''_∞ , $\Delta G''$, G''_2 , m'' , γ''_c 和 γ_2

均为材料参数, $G^*(\gamma)$ 为复模量。

此处仍以胎面胶为例, 先测试出其在不同温度和应变下的储能模量、损耗模量和滞后损耗因子。然后采用上述的修正Kraus模型实现胶料不同工况下动态力学性能的定量描述。图18分别给出了胎面胶的滞后损耗因子在不同温度和应变下的测试数据, 以及Kraus模型对滞后损耗因子的拟合效果。由图18可知Kraus模型和线性插值法的组合可以很好地描述滞后损耗因子与温度和应变之间的函数关系。用同样的方法可以描述轮胎其他部位胶料的动态力学性能随温度和应变的变化规律。



点■, ●, ▲和▼分别为30, 60, 90和120 °C下的测试数据; 蓝色、红色、绿色和橙色曲线分别对应30, 60, 90和120 °C下的拟合曲线。

图18 不同温度和应变条件下胎面胶滞后损耗因子的测试数据和修正Kraus模型的拟合曲线

4 轮胎滚动阻力的测试结果

测力法的核心是轮胎在正向和反向转动条件下获取轮轴上的反作用力(简称轮轴力)。轮胎轮轴力测试过程中体系的重力效应为985.340 N, 测试结果如表3所示。

表3 载荷为额定负荷85%时轮胎的轮轴力测试结果

序号	设定负荷/kN	设定速度/(km · h ⁻¹)	负荷半径/mm	环境温度/°C	轮轴力/N
1	29.602	80	508.429	24.604	869.351
2	29.602	-80	508.529	24.463	1 073.318

含有附加损失的滚动阻力, 即滚动阻力毛值计算方法如下:

$$\frac{(|869.351 - 985.340|) + (|1 073.318 - 985.340|)}{2} \times \left(1 + \frac{508.429 + 508.529}{2 \times 1000}\right) = 153.840 \text{ (N)}$$

经过温度修正公式修正得25℃下的滚动阻力毛值为

$$153.840 \times \left[1 + 0.006 \times \left(\frac{24.604 + 24.463}{2} - 25 \right) \right] = 153.409 \text{ (N)}$$

本研究按照分离法测试附加损失力值,即将轮胎负荷减小到能使轮胎按试验设定速度转动但在转鼓上不产生滑动。对于12R22.5 18PR轮胎,轮轴力测试时标准中推荐的负荷要减小到最小为0.4 kN,但不超过0.5 kN,本测试在负荷为0.45 kN时测试轮胎轮轴力,结果如表4所示。

表4 负荷为0.45 kN时轮胎的轮轴力测试结果

序号	设定负荷/kN	设定速度/(km·h ⁻¹)	负荷半径/mm	环境温度/℃	轮轴力/N
1	0.450	80	537.777	24.478	978.634
2	0.450	-80	537.901	24.530	989.720

滚动阻力的附加损失为

$$\frac{(|978.634 - 985.340|) + (|989.720 - 985.340|)}{2} \times \left(1 + \frac{537.777 + 537.901}{2 \times 1000} \right) = 8.524 \text{ (N)}$$

经过温度修正公式得25℃下的滚动阻力的附加损失为

$$8.524 \times \left[1 + 0.006 \times \left(\frac{24.478 + 24.530}{2} - 25 \right) \right] = 8.499 \text{ (N)}$$

所以,该轮胎的滚动阻力为

$$153.409 \text{ N} - 8.499 \text{ N} = 144.910 \text{ N}$$

滚动阻力系数为

$$144.910 \text{ N} \div 29.602 \text{ kN} = 4.895 \text{ N} \cdot \text{kN}^{-1}$$

5 轮胎滚动阻力仿真分析与测试结果的对比

本研究轮胎滚动阻力仿真值为149.775 N,实际测试值为144.910 N,相对误差为3.357%,轮胎滚动阻力仿真结果略大于试验结果,但相对误差较小,低于5%。说明本研究建立的分析方法可以有效地表征轮胎滚动阻力。

6 结论

完成了载重子午线轮胎有限元模型建立,包括几何结构、材料模型和边界条件等建立,并基于胶料的非线性粘弹性理论、傅里叶级数拟合方法和热力耦合分析法构建了轮胎滚动阻力的高精

度仿真分析方法,通过测力法完成了滚动阻力的测试。经验证,本研究建立的有限元模型和相关分析方法有效,可为低滚动阻力高性能节油载重子午线轮胎的设计和制备提供理论支撑和技术指导。

参考文献:

- [1] 高洪娜. 返炼对绿色轮胎胎面胶中填料分散及加工流变性的影响[D]. 青岛:青岛科技大学,2018.
- [2] Medalia A I. Heat Generation in Elastomer Compounds: Causes and Effects[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1991, 64 (3): 481-492.
- [3] 王梦蛟. 绿色轮胎的发展及其推广应用[J]. 橡胶工业,2018,65(1): 105-112.
- [4] 郁镇寅. 浅谈如何降低轮胎的滚动阻力[J]. 时代汽车,2017(18): 103-104.
- [5] Yoshimura N, Okuyama M, Yamagishi K. The Present Status of Research on Rolling Resistance in Japan[A]. ACS 122nd Rubber Division Meeting Symposium: Tire Rolling Resistance[C]. Chicago, Illinois: American Chemical Society, 1982: 51-68.
- [6] Fontaras G, Samaras Z. On the Way to 130 g CO₂/km—Estimating the Future Characteristics of the Average European Passenger Car[J]. Energy Policy, 2010, 38 (4): 1826-1833.
- [7] 朱晓, 杨情操, 许永斌. 轮胎滚动阻力对汽车燃油经济性的影响分析[J]. 上海汽车, 2016 (7): 59-62.
- [8] 于清溪. 轮胎滚动阻力特性的探讨[J]. 橡塑技术与装备, 2013, 39 (2): 51.
- [9] Gui Y, Zheng J, Ye X, et al. Preparation and Performance of Silica/SBR Masterbatches with High Silica Loading by Latex Compounding Method[J]. Composites Part B. Engineering, 2016, 85: 130-139.
- [10] 陈益艺, 赵素合, 张兴英, 等. 高乙烯基溶聚丁苯橡胶在轮胎胎面胶中的应用[J]. 橡胶工业, 2018, 65 (3): 268-273.
- [11] 林广义, 赵辉绩, 李天涯, 等. 排胶温度对石墨烯改性天然橡胶/顺丁橡胶胎面胶性能影响的研究[J]. 橡胶工业, 2018, 65 (9): 975-979.
- [12] Li F Z, Liu J, Yang H, et al. Numerical Simulation and Experimental Verification of Heat Build-up for Rubber Compounds[J]. Polymer, 2016, 101: 199-207.
- [13] Li F Z, Liu F, Liu J, et al. Thermo-mechanical Coupling Analysis of Transient Temperature and Rolling Resistance for Solid Rubber Tire: Numerical Simulation and Experimental Verification[J]. Composites Science and Technology, 2018, 167: 404-410.
- [14] Ghosh S, Sengupta R A, Heinrich G. Investigations on Rolling Resistance of Nanocomposite Based Passenger Car Radial Tyre Tread Compounds Using Simulation Technique[J]. Tire Science and Technology, 2011, 39 (3): 210-222.
- [15] Yokota K, Higuchi E, Kitagawa M. Estimation of Tire Temperature Distribution and Rolling Resistance under Running Conditions

- Including Environmental Factors[J]. SAE Technical Paper, 2012. DOI:https://doi.org/10.4271/2012-01-0796.
- [16] Ebbott T G, Hohman R L, Jeusette J P, et al. Tire Temperature and Rolling Resistance Prediction with Finite Element Analysis[J]. Tire Science and Technology, 1999, 27(1): 2-21.
- [17] Futamura S. Deformation Index Concept for Hysteretic Energy Loss Process[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1991, 64(1): 57-64.
- [18] Cho J R, Lee H W, Jeong W B, et al. Numerical Estimation of Rolling Resistance and Temperature Distribution of 3-D Periodic Patterned Tire[J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 50(1): 86-96.
- [19] Ejsmont J, Taryma S, Ronowski G, et al. Influence of Temperature on the Tyre Rolling Resistance[J]. International Journal of Automotive Technology, 2018, 19: 45-54.
- [20] Johlitz M, Dippel B, Lion A. Dissipative Heating of Elastomers: A New Modelling Approach Based on Finite and Coupled Thermomechanics[J]. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2016, 28: 1111-1125.
- [21] Aldhufairi H, Olatunbosun O. Developments in Tyre Design for Lower Rolling Resistance: A State of the Art Review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2018, 232: 1865-1882.
- [22] Nyaaba W. Thermomechanical Fatigue Life Investigation of an Ultra-large Mining Dump Truck Tire[D]. Missouri, USA: Missouri University of Science and Technology, 2017.

收稿日期: 2019-04-04

Thermo-mechanical Coupling Analysis and Experimental Verification of Rolling Resistance for TBR Tire

LI Zhao^{1,2}, HAN Dongli¹, ZHU Huaqian¹, LI Guorui², LU Yonglai¹, LI Fanzhu¹

(1. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. Aeolus Tyre Co., Ltd., Jiaozuo 454003, China)

Abstract: This work focused on the high-precision finite element simulation analysis method of the rolling resistance of TBR tire. Firstly, the reliable finite element simulation model of the tire was established according to the required working conditions. Secondly, the method of the tire rolling resistance analysis was established, particularly, the high-precision fitting of Fourier series and the establishment of nonlinear viscoelastic constitutive equation of the compound. Finally, the tire rolling resistance was measured using force measurement method, and the simulation result was compared with test result to verify the effectiveness of the simulation analysis method.

Key words: TBR tire; rolling resistance; finite element simulation; nonlinear viscoelasticity; Fourier series; thermo-mechanical coupling

一种颈椎枕用海绵橡胶 由德清舒华泡沫座椅有限公司申请的专利(公开号 CN 107652564A, 公开日期 2018-02-02)“一种颈椎枕用海绵橡胶”,涉及的海绵橡胶配方为:三元乙丙橡胶 80~120,天然橡胶 50~80,弹性纤维 10~20,远红外陶瓷粉体 1~2,活性氧化锌 3~9,发泡剂 4~12,熏衣草 10~30,多元复合抗菌材料 5~10,二烷基二硫代氨基磷酸盐 1.5~3.5,促进剂DM 2~6。该海绵橡胶弹性好,具有养生保健、抗菌除味的功效,用其制备的颈椎枕便于保养与清洗,能够有效改善睡眠质量,缓解颈椎疼痛。

(本刊编辑部 赵 敏)

一种飞机橡胶减震器材料及其制备方法 由青岛爱飞客航空科技有限公司申请的专利(公开号 CN 107663341A, 公开日期 2018-02-02)“一种飞机橡胶减震器材料及其制备方法”,涉及的材料配方为:乙丙橡胶 40~60,氯丁橡胶 10~20,丁苯橡胶 15~25,氯化聚丙烯 2~4,十溴乙苯 3~7,蠕墨碳 4~8,环烷油 7~11,二异丙苯 3~5,硫黄 4~8。该材料可以满足各个方向刚度和强度的要求,内部摩擦大,减震效果好,有利于越过共振区,衰减高频振动和噪声,弹性模量比金属小得多,可产生较大的弹性形变。

(本刊编辑部 赵 敏)