

轮胎五刚特性的有限元仿真

李晓辉¹, 刘超¹, 林辉宝¹, 宁卫明², 张昆², 冯金巧³

[1. 特拓(青岛)轮胎技术有限公司, 山东 青岛 266061; 2. 山东丰源轮胎制造股份有限公司, 山东 枣庄 277300; 3. 国家超级计算济南中心, 山东 济南 250101]

摘要:以225/50R18半钢子午线轮胎为例, 利用ABAQUS软件对其五刚特性进行仿真, 仿真的边界条件设置完全参照GB/T 23663—2009。通过对轮胎五刚特性试验的有限元仿真, 得到轮胎不同条件变形情况的云图及对应的刚性特性曲线, 仿真结果与试验结果基本一致。该有限元仿真方法可以对轮胎的五刚特性进行提前预报。

关键词:子午线轮胎; 刚性; 有限元分析; 仿真

中图分类号:U463.341; TP391.9

文献标志码:A

文章编号:2095-5448(2019)02-0078-05

DOI:10.12137/j.issn.2095-5448.2019.02.0078

汽车工业是我国国民经济发展的重要支柱产业之一。轮胎是车辆唯一的接地部件, 其力学性能对汽车制动、加速以及转向性能等有较大影响^[1], 与轮胎相关的安全性能日益受到重视。

除了脱圈阻力、强度和耐久性能之外, 轮胎的五刚特性也是评价其安全性能的重要指标。目前国内外主流汽车厂商对原配轮胎的五刚特性提出了明确要求, 相关的试验和仿真研究也越来越受到关注。石琴等^[2]利用ANSYS软件对轮胎的径向、侧向和侧偏刚度进行了仿真分析, 且分析结果与试验结果具有良好的一致性。胡林等^[3]分析了静负荷状态下的轮胎在垂直载荷、侧向载荷、切向载荷作用下的应变分布情况, 在此基础上计算了轮胎的径向刚度、侧偏刚度和切向刚度。GB/T 23663—2009《汽车轮胎纵向和横向刚性试验方法》中制定了统一的轮胎刚性概念和试验方法, 促进了相关研究工作的发展和规范。臧孟炎等^[4]运用仿真分析和试验方法相结合的手段, 全面地对轮胎的五刚特性进行了系统研究, 发现两种方法得到的结果相吻合, 证明了仿真分析的可行性。

本工作以225/50R18半钢子午线轮胎为例, 利用ABAQUS软件对其五刚特性进行仿真分析。为与标准统一, 仿真的边界条件设置完全参照

GB/T 23663—2009及其引文。

1 轮胎的五刚特性

GB/T 23663—2009中只提及了轮胎纵向和横向刚性的试验方法, 但实际应用过程中, 轮胎的刚度特性包含了径向刚性、横向刚性、纵向刚性、扭转刚性和包覆刚性。

轮胎的径向刚性是静负荷试验的延伸, 能够更好地反映轮胎在静负荷下的变形能力; 纵向刚性和横向刚性的匹配影响轮胎的操控性; 扭转刚性反映驾驶者在弯道上转动方向盘使轮胎转向的灵活性; 包覆刚性用于评估轮胎遇到障碍物时的变形情况。总的来说, 轮胎的五刚特性反映的是轮胎抗变形能力, 对评估轮胎的性能具有较大参考价值。

2 轮胎的有限元模型

2.1 材料模型

轮胎五刚特性试验涉及的研究对象为轮胎、轮辋、试验台和突起。相对于轮胎而言, 轮辋、试验台和突起的材料均为金属, 其刚度远大于、变形远小于橡胶部件, 因此本文将轮辋、试验台和突起定义为解析刚体部件。

轮胎由胎面、胎侧、带束层和胎体等多种部件组成, 其中胎面和胎侧为橡胶材料, 胎体和带束层为各向异性的帘线-橡胶复合材料。轮胎材料的本构模型是否能够较好地拟合材料力学性能的测

作者简介:李晓辉(1988—), 男, 河北邯郸人, 特拓(青岛)轮胎技术有限公司工程师, 硕士, 主要从事轮胎性能仿真工作。

E-mail:od0019@tta-solution.com

试结果并具有较好地预报能力,直接影响有限元分析结果的可靠性。本研究涉及的骨架材料均作为线弹性材料进行描述,选用已得到证明的超弹性本构模型^[5-6]来模拟橡胶材料的力学性质,并将橡胶定义为一种接近不可压缩材料。超弹性本构模型的表达式如下:

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + C_{30}(\bar{I}_1 - 3)^3 + \frac{1}{D_1}(J^{el} - 1)^2 + \frac{1}{D_2}(J^{el} - 1)^4 + \frac{1}{D_3}(J^{el} - 1)^6 \quad (1)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \quad (2)$$

$$\bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i \quad (3)$$

式中, U 为每单位体积材料的应变能; C_{10} 和 D_1 为与温度相关的材料参数,其中 D_1 引入了可压缩性; $\bar{I}_1$ 为主伸长比的第一不变量; $\bar{\lambda}_i$ 为偏伸长比; J 为总体积比; J^{el} 为弹性体积比; λ_i 为主伸长比。

2.2 模型建立

若不考虑胎面的横向花纹,轮胎则为典型的轴对称结构。根据材料分布构建二维轮胎断面的有限元模型(如图1所示),利用仿真软件中的 *SYMMETRIC MODEL GENERATION, REVOLVE命令将二维模型旋转生成完整的三维轮胎模型(如图2所示)。由于轮胎包覆刚性试验过程中涉及与突起的接触,且突起的尺寸较小,因此包覆刚性模型需在关键部位做细化处理以保证模拟的准确性和合理性。

轮胎的橡胶结构采用CGAX4H/CGAX3H单元(二维)和C3D8H/C3D6H单元(三维),骨架结构采用SFMGAX1单元(二维)和SFM3D4R单元(三维),通过对面单元赋予加强筋(rebar)的相关参数(包括单根帘线和帘线排列参数)来描述骨架材料的加强作用。胎体和带束层等帘线-橡胶复合材料部件通过使用*Embedded Element命令将橡胶单元及对应骨架材料单元的节点自由度约束在一起来描述。

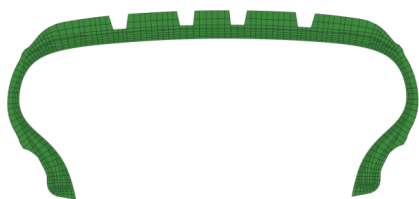
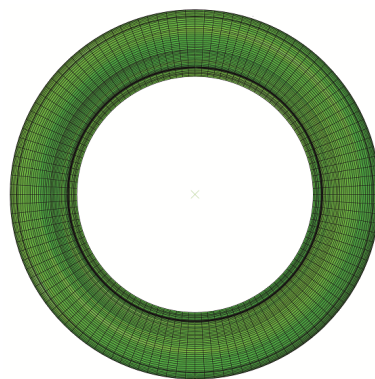
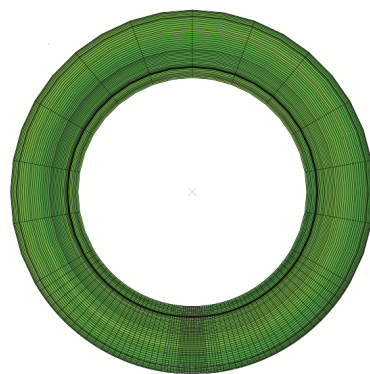


图1 轮胎断面二维轴对称模型



(a) 用于径向、横向、纵向和扭转刚性分析



(b) 用于包覆刚性分析

图2 轮胎五刚特性试验三维有限元模型

2.3 边界条件

在轮胎的静力分析中,通过控制轮辋位置的位移边界控制方法来模拟轮胎的装配过程。固定轮辋,在轮胎内表面线性施加均布压力(0.29 MPa)来模拟轮胎的充气过程。轮胎与轮辋、轮胎与试验台、轮胎与突起之间的接触均采用有限滑移法描述。将轮胎、轮辋、试验台(包覆刚性试验包括突起)模型装配完成后,通过对试验台施加位移约束来模拟轮胎五刚特性的试验过程。

3 轮胎的五刚特性试验

根据GB/T 23663—2009,试验设备包括加载装置、定位装置、试验台以及连续记录力值和位移的记录系统。加载装置能够为轮胎提供试验所需的径向力、纵向力、横向力等,且能够在刚性参数测定试验过程中保持径向力不变。

由于本试验轮胎属于增强型轮胎,因此其充气压力取0.29 MPa。本试验仅对单胎负荷80%的

负荷等级进行仿真和试验对比。在轮胎包覆刚性试验中,突起上升高度取10 mm,其他试验中的试验条件均参照GB/T 23663—2009中的规定条件。

4 结果与讨论

4.1 径向刚性

固定轮辋,保持充气压力为0.29 MPa,向上移动路面,轮胎施加径向载荷,得到轮胎径向变形云图和径向刚性曲线,如图3和4所示。

由图3和4可知,仿真结果较试验结果偏小,但基本吻合。

4.2 横向刚性

固定轮辋,保持充气压力为0.29 MPa,径向负荷为6 076 N,沿横向移动路面,轮胎施加横向载荷,得到轮胎横向变形云图和横向刚性曲线,如图5和6所示。

根据GB/T 23663—2009,只考虑轮胎滑脱之前的部分区间曲线。由图5和6可知,在此区间内,仿真结果与试验结果基本一致。

4.3 纵向刚性

固定轮辋,保持充气压力为0.29 MPa,径向负

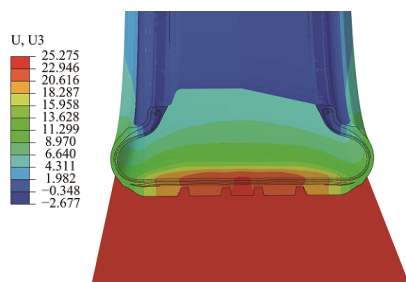
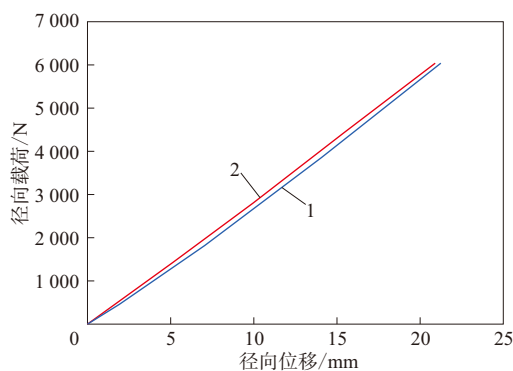


图3 轮胎径向变形云图



1—仿真曲线;2—试验曲线。

图4 轮胎的径向刚性曲线

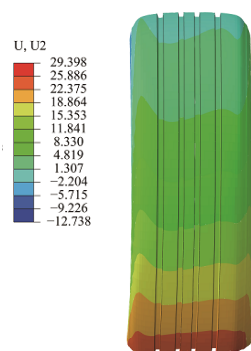
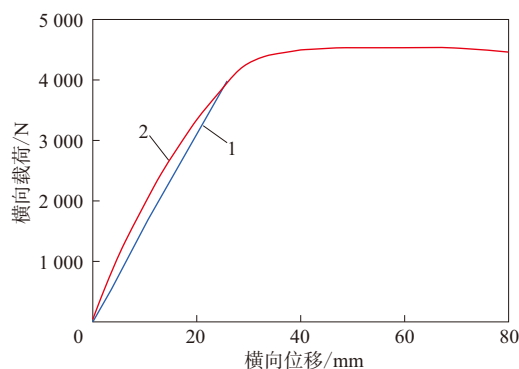


图5 轮胎横向变形云图



注同图4。

图6 轮胎的横向刚性曲线

荷为6 076 N,沿纵向移动路面,轮胎施加纵向载荷,得到轮胎纵向变形云图和纵向刚性曲线,如图7和8所示。

由图7和8可知,与横向刚性相似,在轮胎滑脱之前的区间内,仿真结果与试验结果基本一致。

4.4 扭转刚性

固定轮辋,保持充气压力为0.29 MPa,径向负荷为6 076 N,绕Z轴旋转路面,轮胎施加绕Z轴的扭矩后,得到的轮胎扭转变形云图和扭转刚性曲线,如图9和10所示。



图7 轮胎纵向变形云图

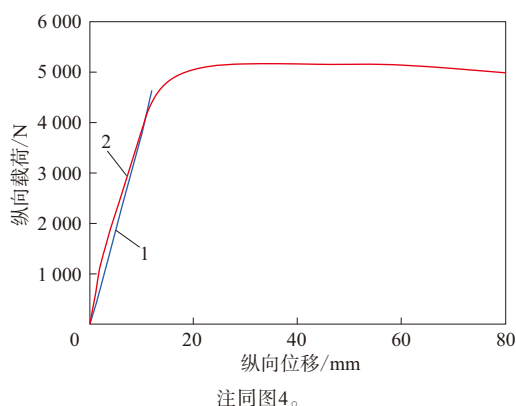


图8 轮胎的纵向刚性曲线

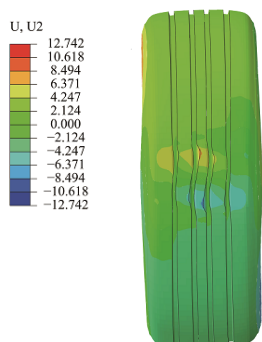
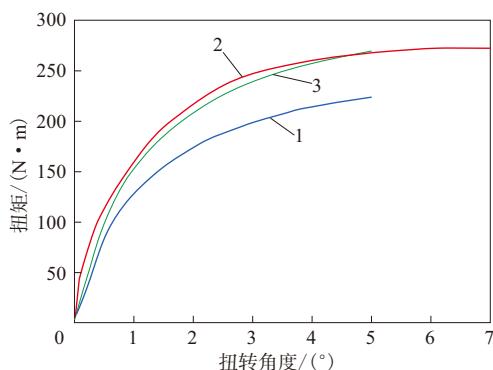


图9 轮胎扭转变形云图



1—仿真曲线；2—试验曲线；3—预测曲线。

图10 轮胎的扭转刚性曲线

由图9和10可知，仿真曲线与试验曲线差别较大，这是因为轮胎实际带束层角度与成型前的设计值有所不同，导致模型产生误差^[7]。采用与文献[7]类似的矫正方法，将仿真结果扩大1.2倍，得到预测曲线，其结果与试验结果基本一致。

4.5 包覆刚性

固定轮辋，保持充气压力为0.29 MPa，径向负荷为6 076 N，控制一个与路面平齐、10 mm宽的突起逐步上移，轮胎施加径向载荷，得到轮胎包覆变

形云图和包覆刚性曲线，如图11和12所示。

由图11和12可知，与试验曲线相比，仿真曲线“先抑后扬”，但趋势基本吻合，有一定参考价值。

综上所述，通过有限元仿真得到的轮胎五刚特性曲线与试验曲线趋势基本一致。由于建模过程中未考虑胎面花纹，且受轮胎实际帘线角度与设计值并不完全一致等因素影响，仿真结果与试验结果存在一定差异。但在进行同一规格轮胎不同设计方案之间的对比时，仿真结果仍能作为轮胎五刚特性变化趋势的有益参考。

5 结论

本研究以225/50R18半钢子午线轮胎为例，利用ABAQUS软件对其进行五刚特性有限元仿真并将仿真结果与试验结果对比，得到以下结论。

(1) 通过轮胎五刚特性试验的有限元仿真，得到轮胎不同条件下变形情况的云图及对应的刚性曲线，且仿真结果与试验结果基本一致。

(2) 轮胎五刚特性有限元仿真方法是合理的，

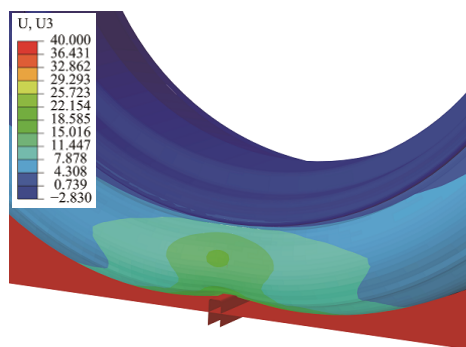
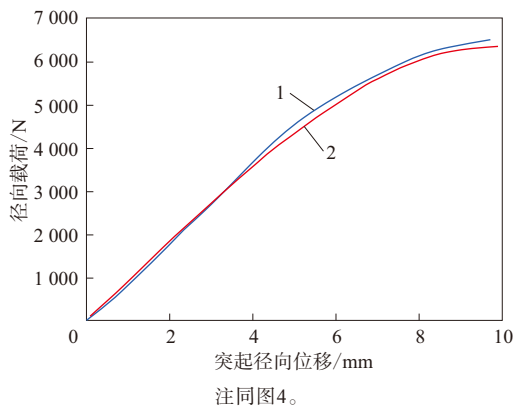


图11 轮胎包覆变形云图



注同图4。

图12 轮胎的包覆刚性曲线

其仿真结果可以在轮胎开发前期对轮胎五刚特性的设计和改善进行预报,具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 长春:吉林科学技术出版社,1991.
- [2] 石琴,陈无畏,洪洋,等. 基于有限元理论的轮胎刚度特性的仿真研究[J]. 系统仿真学报,2006,18(6):1445-1449.
- [3] 胡林,谷正气,黄晶,等. 30.00R51子午线轮胎刚度仿真[J]. 系统仿真学报,2008,20(8):2210-2214.
- [4] 臧孟炎,许玉文,周涛. 三维非线性轮胎的五刚特性仿真[J]. 华南理工大学学报,2011,39(1):129-133.
- [5] 李炜. 子午线轮胎结构有限元分析和设计原理的若干问题研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2003.
- [6] Yeoh O H. Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology,2012,66(5):754-771.
- [7] 应卓凡. 子午线轮胎的刚独特性和制动摩擦力的三维有限元分析[D]. 广州:华南理工大学,2010.

收稿日期:2018-09-10

Finite Element Simulation of Five Kinds of Stiffness Characteristics of Tire

LI Xiaohui¹, LIU Chao¹, LIN Huibao¹, NING Weiming², ZHANG Kun², FENG Jinqiao³

[1. TTA (Qing Dao) Tire Technology Alliance Co., Ltd, Qingdao 266061, China; 2. Shandong Fengyuan Tire Manufacturing Co., Ltd, Zaozhuang 277300, China; 3. National Supercomputer Center in Jinan, Jinan 250101, China]

Abstract: Taking the 225/50R18 semi-steel radial tire as an example, the ABAQUS software was used to simulate its five kinds of stiffness characteristics. The boundary conditions of simulation were set fully according to GB/T 23663—2009. Through the finite element simulation of five kinds of stiffness characteristics test of the tire, the cloud picture of tire deformation under different conditions and the corresponding stiffness characteristic curves were obtained, and the simulation results were basically consistent with the test results. The finite element simulation method could predict the five kinds of stiffness characteristics of tire in advance.

Key words: radial tire; stiffness; finite element analysis; simulation

工信部发布《重点新材料首批次应用示范指导目录(2018年版)》

为进一步做好重点新材料首批次应用保险补偿试点工作,2018年12月26日,工业和信息化部发布了《重点新材料首批次应用示范指导目录(2018年版)》。2017年版目录同时废止。

4种特种橡胶及其他高分子材料被纳入先进化工材料。(1)无卤阻燃热塑性弹性体(TPV),性能要求为:邵尔A型硬度 65~75度,拉伸强度 $>10\text{ MPa}$, 密度 $1.1\text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 阻燃 V0或者符合ISO 6722标准,应用领域为电动汽车、航空航天。(2)烯烃增韧聚苯乙烯(EPO)树脂,性能要求为:发泡20倍时,10%压缩强度 $\geq 0.341\text{ MPa}$, 弯曲强度 $\geq 558\text{ MPa}$; 发泡30倍时,10%压缩强度 $\geq 0.157\text{ MPa}$, 弯曲强度 $\geq 202\text{ MPa}$, 应用领域为船舶、航空航天。(3)新型无氯氟聚氨酯化学发泡剂,性能要求为:外观为无色至浅黄色透明液

体,无机械杂质,密度 $(1.1\pm 0.1)\text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, pH值 8~11,粘度(25℃) $\leq 500\text{ mPa}\cdot\text{s}$, 凝点 $\leq -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 闪点 无,沸点 沸点前分解,水溶性 与水混溶,应用领域为汽车、船舶、先进轨道交通和航空航天。(4)高氟含量氟橡胶材料,性能要求为:门尼粘度[ML(1+4)100℃] 30~60,拉伸强度 $\geq 12\text{ MPa}$, 拉断伸长率 $\geq 120\%$; 275℃老化后拉伸强度 $\geq 10\text{ MPa}$, 拉断伸长率 $\geq 100\%$, 甲醇浸泡后质量增长率 $\leq 5\%$, 应用领域为航空航天、化工。

另外,石墨烯导静电轮胎被纳入前沿新材料,其性能要求为:电导率达到 $1.0\times 10^{-8}\sim 1.0\times 10^{-4}\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$, 抗撕裂强度提升50%, 模量提升50%以上; $100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ —0干地制动距离缩短0.1~0.5 m, $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ —0湿地制动距离缩短1.0~2.0 m, 滚动阻力降低5%~16%, 应用领域为汽车。

(本刊编辑部)