

245/55R18 轮胎五向刚度试验验证

刘军¹, 汤梅², 陈小龙², 李海艳²

(1. 八亿橡胶有限责任公司, 山东 枣庄 277800 ;

2. 山东丰源轮胎制造股份有限公司, 山东 枣庄 277300)

摘要 : 针对 245/55R18 规格, 忽略胎面花纹对轮胎刚度的影响, 利用 REBAR 单元模型模拟帘线-橡胶复合材料, 建立轮胎三维有限元模型, 运用非线性有限元分析软件 ABAQUS 针对半钢子午线轮胎进行分析, 探究其在受到如下作用力的情况下的形变, 包含纵向、径向、横向等方向的载荷, 进而对轮胎的五刚特性进行剖析。结果表明, 试验测得的五刚特性(扭转刚度、径向刚度、纵向刚度、纵向刚度、包覆刚度)结果与仿真分析得到的五刚特性结果基本一致, 确认了仿真方法的有效性。

关键词 : 轮胎; 五向刚度; 验证; ABAQUS

中图分类号 : TQ336.1

文献标识码 : B

文章编号 : 1009-797X(2025)08-0049-06

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2025.08.011

2021 年之后科研机构 and 高校逐渐成为轮胎前端研究的主力军, 在力学研究方面, 对于“有限元仿真分析”法的应用越来越多^[1], 使其也逐渐成为轮胎在结构设计方面的优势软件, 紧随其后出现了 TU、TOCT、PDEP、TT 等理论应用于轮胎设计, 理论中涉及较多的是关于骨架材料(带束层、胎体)与轮胎其它胶部件之间相互的受力分析等^[2~6]。

轮胎涉及的众多力学性能参数中, 刚度特性是尤为重要的, 刚度特性与汽车的操控性能、驾乘舒适性等息息相关, 并且是参与汽车设计的全流程的重要参数^[7~8]。

本文针对公司生产的 245/55R18 规格半钢子午线轮胎, 研究者利用 hypermesh 等前处理软件——建立有限元仿真模型(光面轮胎)。在研究中综合考虑橡胶材料的非线性、接触非线性、几何非线性等因素, 运用 abaqus 分析软件进行 245/55R18 规格半钢子午线轮胎的五项刚度仿真模拟计算, 并将模型的计算结果与五刚实验结果做了对比, 最终验证了研究所运用的仿真分析方法的可靠性。

1 建立有限元仿真模型

1.1 二维截面几何模型

借鉴过往的研究, 我们得知在轮胎的刚度特性方面, 轮胎表面花纹的影响很小; 结合上述研究经验, 下面的建模, 不将花纹的影响放在考虑范围之内, 可

提高计算效率。如图 1 所示, 利用 CAD 建立轮胎的二维截面几何模型, 并进行部分简化修改: 狭长尖角改成倒角, 将材料特性近似且位置相邻的部分合并。

1.2 网格划分

将几何模型导入 hypermesh 软件中并对其二维网格划分, 得到轮胎的 2d 网格模型。描述橡胶帘线的模型主要有复合材料模型和 REBAR 模型, 考虑到 REBAR 模型可以将多个帘线层表示在同一个单元内, 且不会增加自由度, 本文采用 REBAR 单元模拟轮胎的帘线模型。

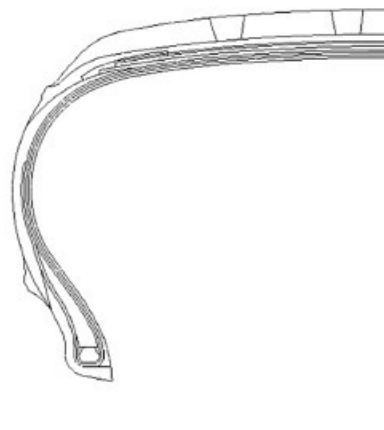


图 1 轮胎几何模型

作者简介 : 刘军 (1983—), 男, 助理工程师, 主要从事轮胎质量及认证管理相关工作。

1.3 定义属性、边界条件及加载

将得到的二维网格导入到 abaqus 中, 首先定义属性分别定义网格单元和接触等属性, 定义轮胎各部位的材料属性, 定义边界条件; 然后模拟轮胎装配、充气。为解决有限元仿真分析的关键问题—接触, 通过下述两项措施, 提高过程的计算精度、计算效率。

(1) 将轮胎行驶的路面和轮胎装配使用的轮辋, 在定义方面为解析刚体。

(2) 接触方式采用面面接触。

二维分析时, 先将轮胎两侧胎圈部位沿轴向进行一定的位移, 再对轮胎内表面施加均匀的法向压力, 实现轮胎的充气。

1.4 轮胎三维有限元模型及仿真

在 ABAQUS 中, 三维模型的生成主要通过 *symmetric model generation 关键字的运用, 并将轮胎二维模型进行旋转。在旋转过程中需对轮胎与路面接触的部位进行网格加密, 以保证仿真计算的精确性与收敛性。

五向刚度仿真时首先将轮辋进行固定, 预加载方式, 方式为对地面施加位移进行预加载, 精确加载方式, 方式为施加作用力, 这样计算的收敛性得到提高。

1.5 材料性能

在 abaqus 分析软件中, Mooney-Rivlin、Yeoh、Ogden 等本构模型, 均可用于处理橡胶材料。这些本构模型均有自己的独特之处, 对橡胶材料力学性的表征效果也各有千秋, 有的模型优势是——拟合小变形的试验数据, 有的模型优势则反其道而行之——适合拟合大变形的试验数据。本项目结合轮胎相应的力学特性, 同时为了达到更高的精度和稳定性, 选用与之比较切合的 Yeoh 本构模型。

1.6 带束、胎体、胎圈等骨架材料

半钢子午线轮胎的骨架材料包含: 胎体、带束层、冠带层、胎圈, 它们都是复合材料, 因为其各向异性的性质, 模拟的难度较大。解决方案, 通过嵌入加强筋 (rebar) 单元的方法来模拟钢丝帘线的力学性能。这种嵌入加强筋 (rebar) 单元的方法是 ABAQUS 软件中自带的一种方法, 用于基体单元模拟橡胶材料力学性能^[6]。这种嵌入加强筋的方法更加简单有效 (与各向异性的材料模型相比)。

在 ABAQUS 中, 加强筋可以定义在 surface 单元或者 membrane 单元上。本项目采用在 surface 单元内定义加强筋层的方法。定义加强筋层材料参数除

定义橡胶材料和钢丝帘线的材料特性外, 还需定义钢丝帘线的横截面积、间距和帘线与子午面的夹角。

1.7 单元类型

有限元分析计算软件 ABAQUS, 现行的通用性较广, 属于全球范围内适用, 为了解决用户在实际工程中出现的各类问题, ABAQUS 在其单元库中构建了大量的单元类型, 供其选择。这样用户将面临“选取单元类型”的困扰。ABAQUS 分析软件根据“自由度信息、节点数量、差值函数的阶次和单元的数学描述方式”等不同的排列和不同的使用范围, 单元类型总计被划归为八个大的类型, 需要根据具体问题出现的针对性进行分析、综合考虑后选定。

ABAQUS 中, 通过模拟“泊松比 $\nu=0.5$ ”的不可压缩材料或者模拟“泊松比 $\nu>0.475$ ”的接近于不可压缩材料, 是 ABAQUS 单元库中的杂交单元的主要用途。

在 ABAQUS 单元库中, 与杂交单元相对应的是实体单元。当“泊松比 $\nu=0.5$ ” (不可压缩) 的材料受力后发生形变, 其体积不变, 不能使用节点的纯位移差值函数来构造单元 (适用于压缩材料)。为此 ABAQUS 软件专门构建一种特殊用途的“杂交单元”, 用以解决“泊松比 $\nu=0.5$ ”的材料 (不可压缩) 仿真的问题。单元压应力附加的自由度信息可以直接通过杂交单元来确定, 节点的位移场可以计算偏应力和偏应变。

ABAQUS 分析软件中的单元库, 每个“单元”名称具有唯一性, 它们的名称用以表征单元“单元族、自由度信息、节点数量、数学描述、积分形式”等五个方面的基本信息。轮胎是轴对称的, 我们建立二维 (轴对称) 模型模拟其断面, 使用轴对称单元。橡胶材料的四边形使用 CGAX4H 模拟, 橡胶材料的三角形使用 CGAX3H 模拟; surface 单元 SFMGAX1, 应对 rebar 单元, 同样是轴对称的。当橡胶材料单元, 扩展为 C3D8H、C3D6H 单元以后, 模型完成二维到三维模型的转变, 且单元从 rebar 扩展为 SFM3D4R。

2 仿真分析及实验验证

实验室中五向刚度试验测试使用的设备的生产厂家是: 浩大轮胎测试装备有限公司产品。

该试验设备上配有位移和力两种传感器, 用于测量轮胎的五种刚度特性, 可以验证轮胎结构的性能等信息。

试验条件设定：试验轮胎充气至 0.25 MPa（规定气压），要求 $24\pm3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下停放 24 h。24 h 后，将试验轮胎装配到设备上，设备将侧倾角设置为 0° ，同时要求待测试轮胎的底面恰好与试验机平台接触，通过调整轮辋中心高度实现，检测的时候保持环境温度 $24\pm3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不变。试验过程按照标准要求的加载速度施加载荷，整个过程要求如实进行数据记录和曲线测量。

2.1 第一项径向刚度性

轮胎的径向刚度特性又称静负荷特性：是指安装在标准轮辋上的轮胎，在标准压力下轮胎径向载荷与径向变形的比值，用于表征轮胎对于负荷的承受能力，通常是我们评价轮胎性能的其中一项最重要的指标，轮胎的径向刚度特性与轮胎自身的使用周期息息相关，同时与车辆性能的匹配性关系密切；径向刚度示意图详见图 2。

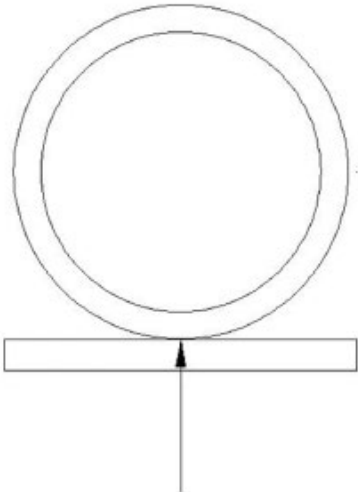


图 2 径向刚度示意图

2.1.1 径向刚度试验的方法

首先，将试验轮胎安装在五向刚试验设备上，随后向轮胎施加 $50\pm2.5\text{ mm/min}$ 的径向加载速度，将其加载至轮胎标准负荷值，加载完毕后，保持压力 60 s。这样就可以通过测试曲线（记录），得到关系图（径向载荷—径向变形）。

2.1.2 模拟方法

首先，模拟充气气压，将均布载荷（0.25 MPa）施加在轮胎内衬层的内表面；随后将轮辋进行固定，以垂直向上的方式移动“五向刚试验设备”的路面使路面与试验轮胎接触到一起；施加“径向方向”额定载荷 100% 的载荷，模拟得到试验轮胎的径向刚度特

性。

径向刚度设备试验结果与仿真分析所得结果详见图 3。

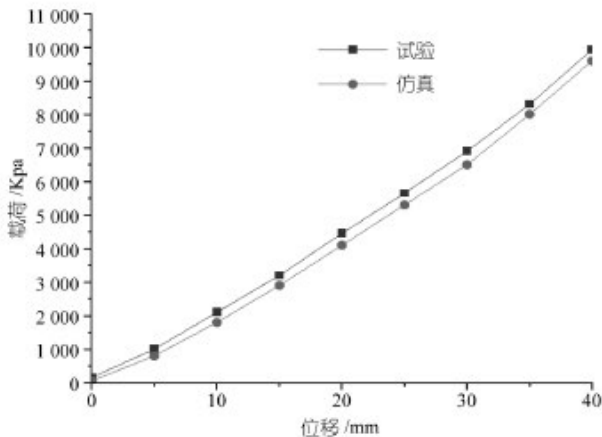


图 3 径向刚度特性仿真与设备实测对比曲线

2.2 第二项横向刚度性

汽车的操纵稳定性，很大程度上取决于轮胎的侧偏性能，而侧偏性能很大程度上由横向刚度决定。横向刚度：可以用轮胎的横向载荷与横向变形的比值表征（承受一定垂直载荷的情况下）。横向刚度示意图详见图 4。

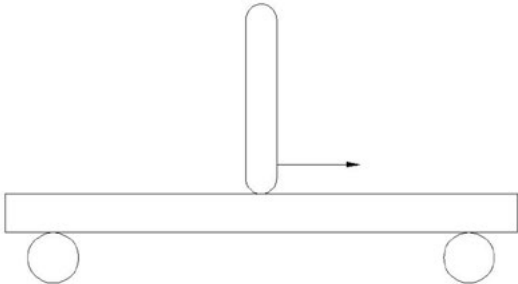


图 4 横向刚度示意图

2.2.1 设备试验方法

首先，将试验轮胎装配到五向刚试验设备，然后给轮胎施加“最大负荷 80%”的垂直静载荷，加载完毕后，保持 60 s。然后保持垂直方向“最大负荷 80%”的载荷不变，轮胎保持不变，横向平移“五向刚试验设备”的试验台，平移速度为 0.5 mm/s，当试验轮胎与试验台接触面开始产生相对滑动。这样就可以通过测试曲线（记录），得到关系图（横向载荷—横向变形）。

2.2.2 仿真模拟方法

首先，在仿真完径向刚度特性的基础上，模拟气压保持不变，随后将轮辋进行固定，固定路面在除轮胎横向方向上的位移自由度。实现横向加载，需要横

向移动路面 6 cm。模拟得到轮胎的横向刚度特性。

横向刚度设备试验结果与仿真分析所得结果详见图 5。

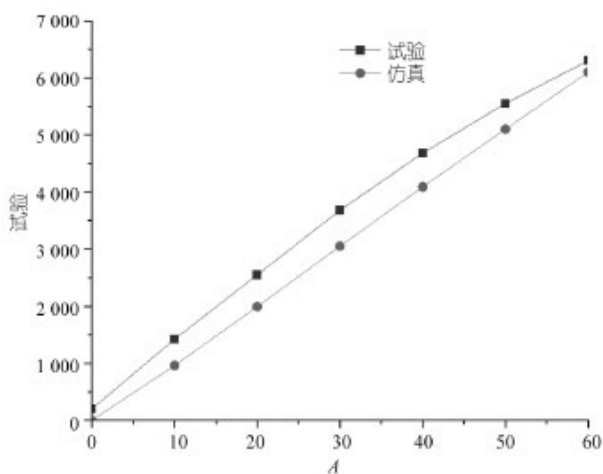


图 5 横向刚度特性仿真与设备实测对比曲线

2.3 第三项纵向刚度特性

汽车的行驶性能相关的加速性和制动性，很大程度上取决于轮胎的纵向刚度特性。纵向刚度特性：可以用轮胎纵向载荷与纵向变形的比值表征（承受一定垂向载荷的情况下）。纵向刚度示意图详见图 6。

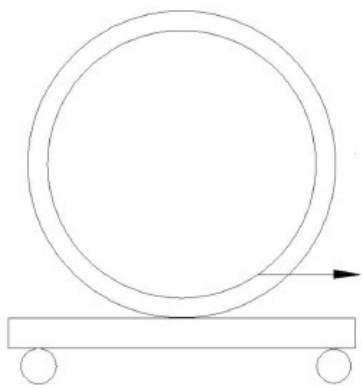


图 6 纵向刚度示意图

2.3.1 设备试验方法

首先，将试验轮胎装配到五刚试验设备，然后给试验轮胎施加“80% 最大负荷”的垂向静载荷，加载完毕后，需要保持 60 s。然后在垂直方向“最大负荷 80%”的载荷保持不变，实验轮胎保持不变的前提下，纵向平移试验台，平移速度为 0.5 mm/s，当试验轮胎与试验台接触面后开始产生相对滑移。这样就可以通过测试曲线（记录），得到关系图（横向载荷—纵向变形）。

2.3.2 仿真模拟方法

纵向刚度特性模拟方法与横向类似，首先，在仿真完径向刚度特性的基础上，模拟气压保持不变，随后将轮胎进行固定，固定路面在除轮胎纵向方向上的位移自由度。实现纵向加载，需要纵向移动路面 6 cm。模拟得到轮胎的纵向刚度特性。

纵向刚度设备试验结果与仿真分析所得结果详见图 7。

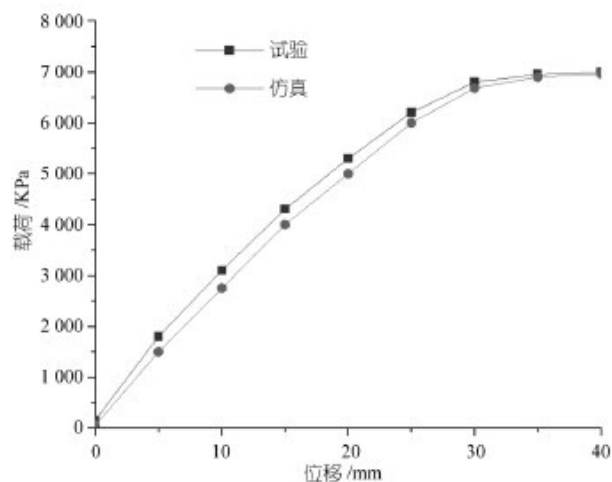


图 7 纵向刚度特性仿真与设备实测对比曲线

2.4 第四项扭转刚度特性

扭转刚度特性：可以用轮胎的转向载荷与转向变形的比值表征（承受一定垂向载荷的情况下）。扭转刚度示意图详见图 8。

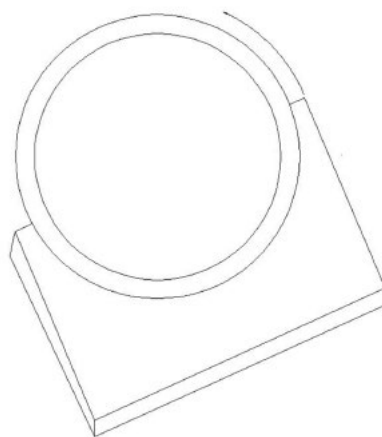


图 8 扭转刚度示意图

2.4.1 设备试验方法

首先，将试验轮胎装配到五刚试验设备，然后给轮胎施加“最大负荷 80%”的垂向静载荷，加载完毕后，保持 60 s。然后保持垂直方向“最大负荷 80%”的载荷不变，轮胎以扭转角加载速度为 10(°/min) 的速度

加载旋转试验台，当试验台接触面与轮胎开始产生相对滑移。这样就可以通过测试曲线（记录），得到关系图（转向载荷—转向变形）。

2.4.2 仿真模拟方法

首先，在仿真完径向刚度特性的基础上，模拟气压保持不变，随后将轮辋进行固定，固定路面在除轮胎横向方向上的位移自由度。旋转路面 10° ，模拟得到轮胎的扭转刚度特性。

扭转刚度设备试验结果与仿真分析所得结果详见图 9。

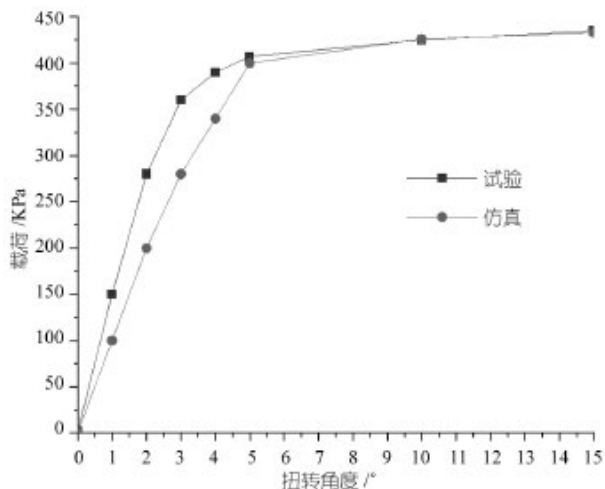


图 9 扭转刚度特性仿真与设备实测对比曲线

2.5 第五项包覆刚度特性

汽车乘坐的舒适性，很大程度上取决于轮胎对路面上小于其印迹的障碍物的包容能力，汽车轮胎把路面上的凸起包进去的能力。尤其在路面条件不太好的情况下，良好的轮胎包容特性对降低汽车振动尤为重要。而包覆刚度特性就可以很好的反映该项能力，包覆刚度示意图详见图 10。

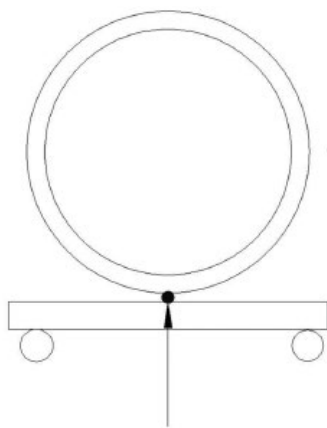


图 10 包覆刚度示意图

2.5.1 试验方法

根据接地方式的不同，刚度的试验方法有平面接地和凸起接地两种。上述四种刚度试验方法属于平面接地，而包覆刚度的试验方法属于凸起接地。将轮胎安装到五刚试验机上，先给轮胎预施加垂向静载荷，载荷大小为该气压下轮胎最大负荷的 80%，加载完毕持压 1 min。固定轮辋，再在轮胎与试验台接触处施加向上凸起的负荷，包络块以 1 mm/sec 的速度上升至 10 mm。记录测试曲线，即凸起荷重与凸起高度的关系图。

2.5.2 模拟方法

光面轮胎模型的模拟方法与其他刚度有所不同，在 2D 模型旋转生成 3D 模型过程中，须对轮胎与突起接触部分的网格做进一步加密处理，以保证仿真计算的精确度和收敛性。然后完成径向加载，最后抬升突起块，实现包覆刚度模拟加载。

包覆刚度仿真分析与试验结果如图 11 所示。

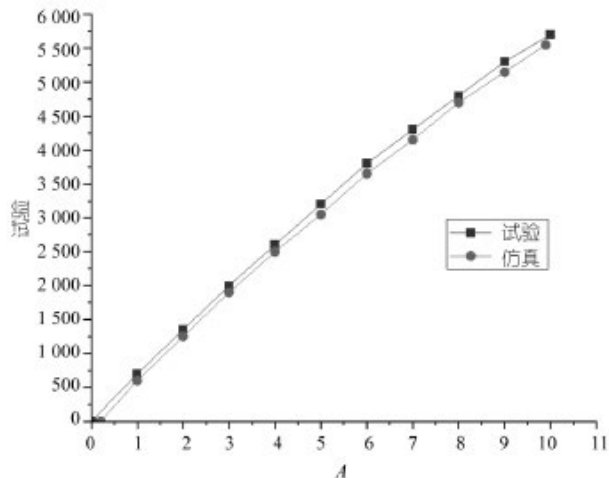


图 11 包覆刚度特性仿真与设备实测对比曲线

3 结语

本项目以 245/55R18 型子午线轮胎为研究对象建立轮胎三维非线性有限元模型，在充分考虑轮胎的几何非线性、材料非线性及接触非线性等因素的基础上，使用 ABAQUS 软件模拟轮胎装配和充气过程，全面分析了光面轮胎模型和花纹轮胎模型在五种不同负荷作用下轮胎的刚度特性。将仿真结果与试验结果进行对比，总体趋势一致、结果相近。以上结果，说明了有限元仿真分析方法的有效性。这一项目的完成，为后续轮胎结构优化和整车性能仿真评价起到了部分借鉴作用。

参考文献：

- [1] 赵颖, 周科名, 杜卓栋, 等. 新型蝙蝠型负泊松比微结构非充气轮胎设计 [J/OL]. 重庆理工大学学报 (自然科学), [2024-04-16]1-13.
- [2] 郑涛, 龙飞飞, 邵红琪. 硅烷偶联剂并用体系对白炭黑 / 溶聚丁苯橡胶 / 天然橡胶复合材料结构和性能的影响 [J]. 合成橡胶工业, 2023,46(06):538-544.
- [3] 郑涛, 邵红旗. 改性溶聚丁苯橡胶对轮胎胎面胶性能的影响 [J]. 合成橡胶工业, 2020,43(05):414-418.
- [4] 孙稷, 郑涛, 张宁, 等. 相同牌号不同厂家炭黑在胎侧配方中的应用 [J]. 弹性体, 2021,31(02):52-55.
- [5] 郑涛, 邵红琪, 吴晓辉, 等. 硅烷偶联剂原位改性白炭黑 / 溶聚丁苯橡胶复合材料的流变性能和力学性能研究 [J]. 橡胶工业, 2022,69(09):652-658.
- [6] 刘玉国, 郑涛. SUV 轮胎胎面胶的配方优化 [J]. 橡胶工业, 2023,70(07):516-521.
- [7] 王宁宁. 子午线轮胎径向接地特性试验与仿真研究 [D]. 厦门理工学院, 2022.
- [8] 刘浩. 子午线轮胎花纹分区差异性对轮胎刚度的影响研究 [D]. 江苏大学, 2022.

Verification of five-directional stiffness test for 245/55R18 tire

Liu Jun¹, Tang Mei², Chen Xiaolong², Li Haiyan²

(1. Bayi Rubber Co. LTD., Zaozhuang 277800, Shandong, China;

2. Shandong Fengyuan Tire Manufacturing Co. LTD., Zaozhuang 277300, Shandong, China)

Abstract: This paper focuses on the 245/55R18 tire specification, neglecting the influence of tread patterns on tire stiffness. A three-dimensional finite element model of the tire is constructed using the REBAR element model to simulate the cord-rubber composite material. Researchers utilize the nonlinear finite element analysis software ABAQUS to conduct an in-depth analysis of the semi-steel radial tire, studying its deformation under different directional loads such as longitudinal, radial, and lateral loads. Subsequently, a detailed analysis of the tire's five stiffness characteristics (torsional stiffness, radial stiffness, lateral stiffness, longitudinal stiffness, and wrap stiffness) is conducted. The research results indicate that the experimental data of the five stiffness characteristics are essentially consistent with the simulation analysis results, validating the effectiveness of the simulation method.

Key words: tire; five-directional stiffness; verification; ABAQUS

(R-03)

