

三角平衡轮廓轮胎力学性能的研究

薛梓晨 贺建芸 杨卫民 焦志伟*
(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

摘要:以255/30R22传统轮胎轮廓为参考对象,通过改变传统轮胎轮廓断面形状提出了一种新的轮胎断面轮廓——三角平衡轮廓,利用ABAQUS软件建立三角平衡轮廓轮胎的三维有限元模型,对标准负荷工况下骨架材料的受力、轮胎接地印痕、接地压力分布以及径向刚度等进行了分析。研究表明,相比传统轮廓轮胎,三角平衡轮廓轮胎的骨架材料接地区域内沿胎面横向方向整体应力分布较均匀,第1胎体层端部、第2带束层端部、两层冠带层端部变形较小,而第2胎体层端部变形较大;较小的接地印痕面积和较高的径向刚度实现了三角平衡轮廓轮胎翻转力臂的减小和真圆度的逼近,从而达到降低轮胎滚动阻力的目的。

关键词:三角平衡轮廓;滚动阻力;非线性有限元分析;支撑块

中图分类号: TQ336.1; TB124

引言

在现代汽车工业中,降低轮胎滚动能量损失是减少能源消耗的有效方法,并逐渐成为轮胎制造商和研究者关注的焦点。轮胎的滚动阻力能量损失与材料特性、轮胎结构和工作条件有着密切的关系^[1]。目前围绕降低滚动阻力进行的研究多集中在材料的开发上,通过优化轮胎轮廓结构降低其滚动阻力的研究较少。

对轮胎滚动阻力模型的研究开始于20世纪70年代^[2-3],而随着计算机技术和高性能计算的飞速发展,轮胎滚动阻力模型逐渐趋向于精确和细化。基于有限元分析技术,轮胎行业出现了一些轮胎结构优化理论^[4-5],如最佳滚动轮廓理论、最佳张力控制理论、动态模拟最佳轮廓理论和预应力理论等,通过对轮胎的断面轮廓形状进行优化以提高轮胎的使用性能。

本文在已有的轮胎结构优化理论基础提出了一种新型的三角平衡轮廓,通过减小胎体形状的变形来达到降低轮胎滚动阻力的目的;选取255/30R22传统轮胎轮廓为参考对象,利用ABAQUS软件,在标准负荷工况下,对三角平衡轮廓轮胎和传统轮廓轮胎的有限元分析进行比较。

1 三角平衡轮廓

三角平衡轮廓是指以低扁平率的传统轮胎轮廓为基础,通过增大轮胎自由状态下的断面水平轴到胎圈的距离、缩短着合宽度、在胎肩部与胎侧部的内轮廓处增添高强度和耐高温耐磨损的支撑块来对轮胎轮廓结构进行优化。

从图1中可以看出,三角平衡轮廓在自由状态下胎面部和胎侧部区域内的胎体层断面轮廓呈等腰三角形,且三角形的顶角远大于传统轮廓轮胎。当三角平衡轮廓处于标准充气压力工况时,胎肩部与胎侧部所夹的支撑块不断地受充气压力的挤压,使得胎冠沿胎面横向方向被拉直,同时胎冠部的胎体帘线呈张紧状态。当三角平衡轮廓轮胎承受载荷时,一方面高硬度的支撑块提高了胎侧的刚性;另一方面胎侧部被支撑块不断地挤压,使得胎冠部的胎体帘线被张紧拉直,提高了胎冠部的整体刚性,实现了胎冠部和胎侧部刚度的整体提高,从而使静负荷工况下轮胎的下沉量减小,实现翻转力臂的减小和真圆度的逼近,轮胎滚动阻力降低^[6],这与文献^[7]通过减小轮胎胎体变形而降低滚动阻力的研究思路相一致。另外,三角平衡轮廓轮胎胎冠部和胎侧部较高的刚度与稳定的三角形结构使胎体层断面轮廓在滚动过程中基本不发生变化,提高了轮胎行驶的稳定性;当轮胎处于漏气或零气压状态时,支撑块还起着承受车身重量的作用,从而提高轮胎的安全性。

收稿日期: 2013-02-04

第一作者: 男,1989年生,硕士生

* 通讯联系人

E-mail: jiaozw@126.com

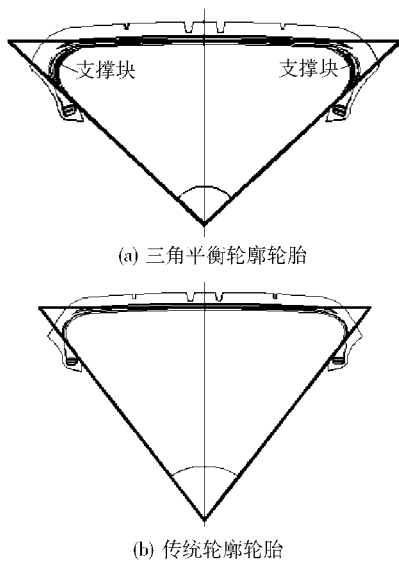


图 1 二维断面轮廓

Fig. 1 Two dimensional cross-section profile

2 轮胎有限元模型的建立

2.1 材料模型

橡胶是一种典型的具有不可压缩性质的超弹性材料,其应力应变关系表现出明显的非线性。工程上常用的本构模型^[8]主要有 Mooney - Rivlin 模型和 Yeoh 模型,由于轮胎的变形较大,且 Yeoh 模型对复杂的变形状态具有较好的预报能力,因此本文选用 Yeoh 模型描述橡胶的力学性能。

各类帘线均为正交各向异性材料,采用线弹性模型,并通过 Embed 功能将其嵌入到与之相对应的橡胶中进行模拟。轮辋和地面定义为解析刚体。

支撑块选用线弹性模型,在保证刚性的同时又具有一定的弹性。由于聚氨酯弹性体具有优异的耐磨性能、抗撕裂强度和较高的弹性等优点,因此支撑块的材料选用聚氨酯弹性体,取其杨氏模量为 510 MPa,而泊松比根据材料的特性取 0.4^[9]。

2.2 接触算法和边界条件

常用的方法^[10]有 Lagrange 乘子法、罚函数法、混合法以及基于求解器的直接约束法,综合考虑计算时间、计算效率等因素,本文采用罚函数法求解接触问题。胎圈与轮辋之间的摩擦系数设为 0.35,胎面与地面之间的摩擦系数设为 0.5。

2.3 有限元模型的网格划分

基于 255/30R22 传统轮胎轮廓,在 ABAQUS 软件中建立三角平衡轮廓轮胎和传统轮廓轮胎的二维轴对称模型,并对其进行网格划分,如图 2 所示。

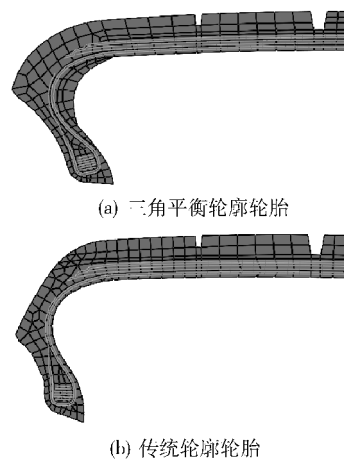
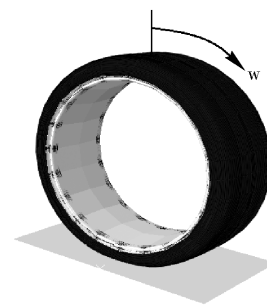


图 2 不同轮廓轮胎的二维断面网格

Fig. 2 2D meshing of different tire profiles

利用 symmetric model generation 功能,对轮胎接地部分进行网格细分。三维有限元模型选取传统轮廓轮胎的标准轮辋 9J 进行装配,如图 3 所示。本文仅考虑纵向花纹沟,三角平衡轮廓轮胎的三维有限元模型有 39574 个单元,69934 个节点。传统轮廓轮胎的三维有限元模型有 38728 个单元,69248 个节点。充气压力为 0.29 MPa,并对轮辋逐步施加标准载荷 5520 N 进行模拟分析。



w 为骨架材料沿圆周方向的受力分析路径

图 3 三维有限元模型

Fig. 3 3D finite element model

2.4 模型验证

测试条件:室温,充气压力为 0.22 MPa,静负荷为 5650 N。有限元分析结果和试验结果对比如表 1 所示,仿真值误差控制在 7% 范围内,满足工程要求,因此可利用该模型和分析方法来进行轮胎力学性能的研究。从表 1 中可以看出,三角平衡轮廓轮胎的接地印痕面积明显小于传统轮廓轮胎,说明在相同试验条件下,三角平衡轮廓轮胎的翻转力臂较小及真圆度较高,进一步证明了三角平衡轮廓轮胎具有低滚阻的优势。

表 1 两种不同轮廓轮胎有限元仿真结果和试验结果的对比

Table 1 Comparison of simulation results and test results for different tires

项目	仿真值		试验值*
	三角平衡轮廓	传统轮廓	
印痕面积/cm ²	202.3	224.8	216.2
下沉量/mm	9.8	17.6	18.6
接地长度/mm	97	124	123
接地宽度/mm	230	223	215

* 为 255/30R22 传统轮廓轮胎测试的试验值

3 结果与讨论

3.1 轮胎骨架材料的力学性能分析

3.1.1 接地区域内的横向受力

不同轮廓轮胎接地断面 Mises 应力分布如图 4 所示。与传统轮廓轮胎相比,三角平衡轮廓轮胎侧应力较小,高应力主要集中在支撑块、胎肩、胎圈与轮辋接触的部位。由于支撑块与周围橡胶力学性能差异较大,因此高应力区集中在两种材料的接触面上,并且相比其他橡胶部位其应力水平高出许多。在轮胎行驶过程中,支撑块附近区域的周期性交变应力会产生许多热量,支撑块易产生疲劳破坏,且很有可能由于贴合面生热过大和粘合强度不足使得贴合面破坏而产生脱空现象,从而降低轮胎的使用寿命,因此合理的支撑块结构设计和材料选择对于降低轮胎疲劳破坏和提高轮胎使用寿命具有重要的意义。为解决粘合强度不足的问题,在实践中通过不断地调整配方来选取与胎体橡胶材料性能相匹配的聚氨酯材料,从而降低材料界面间的应力集中。

骨架材料接地区域横向受力分析如图 5 所示。与传统轮廓轮胎相比,三角平衡轮廓轮胎的带束层、冠带层和胎体层接地区域内沿胎面横向方向整体应力水平分布明显均匀,胎冠中央附近应力较高,而位于胎肩处应力却很低,另外,第 2 带束层端部、两层冠带层端部应力也很低。分析原因是一方面增添的支撑块刚性较大,提高了胎侧的刚性,从而减小了胎肩与胎侧处骨架材料的受力。另一方面,当轮胎充气时支撑块承受充气压力的挤压,使胎冠沿胎面横向方向被拉直,增加了胎冠中央附近的骨架材料受力,减小了骨架材料端部受力,从而减小了骨架材料端部的变形。

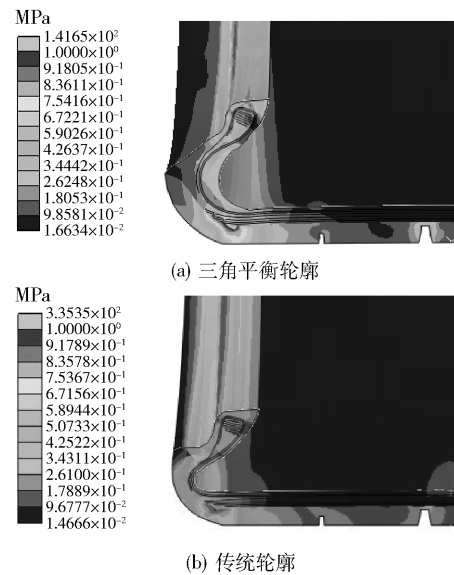


图 4 不同轮廓轮胎接地断面 Mises 应力分布
Fig. 4 Mises stress distributions of different profile tires in grounding cross section

3.1.2 端部的周向受力

考虑到轮胎经常在帘线端部出现破坏,因此对骨架材料端部沿周向进行受力分析,其端部周向分析位置和周向旋转方向分别如图 6 和图 3 路径 w 的箭头所示,这对预测轮胎的使用寿命具有一定的参考价值。

骨架材料端部周向受力分析如图 7 所示,其中 α 为骨架材料端部沿轮胎周向旋转角度。在接地区域内骨架材料的应力变化最大,且应力变化最大值与最小值之差也最大,因此,在接地区域内的变形也是最大的。对比分析发现,三角平衡轮廓轮胎第 2 带束层和两层冠带层在接地区域内的应力极值之差远小于传统轮廓轮胎,说明第 2 带束层和两层冠带层在接地区域内的端部变形很小,因此可避免钢丝带束层因变形过大生热而导致脱层现象的发生。相比传统轮廓轮胎,反包至三角胶附近的第 1 胎体层整体应力水平较高,接地区域内的应力极值之差较小,而反包至胎侧的第 2 胎体层接地区域内的应力极值之差较大,说明接地区域内第 1 胎体层端部变形较小,而第 2 胎体层端部变形较大。

3.2 轮胎接地性能分析

3.2.1 接地印痕及其受力

不同轮廓轮胎的接地印痕如图 8 所示。三角平衡轮廓轮胎的接地印痕沿胎面横向长度基本相同,而纵向长度明显小于传统轮廓轮胎,说明三角平衡

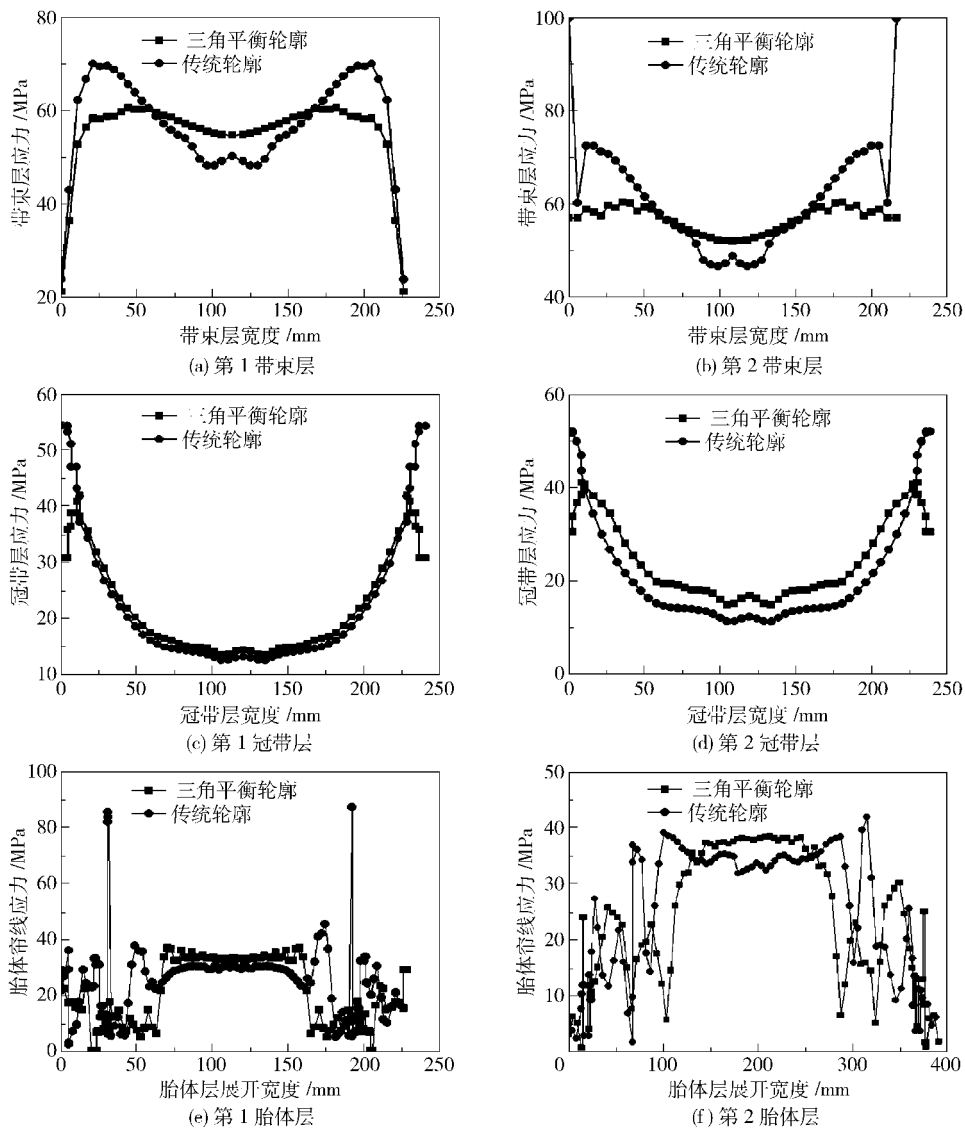


图5 骨架材料接地区域横向受力分析

Fig.5 Transverse stress analyses of framework materials in the grounding area

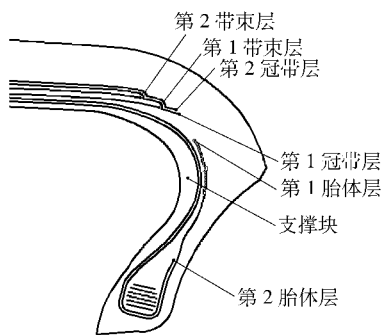


图6 骨架材料端部周向分析位置

Fig.6 The circumferential analysis location of the framework materials

轮廓轮胎的接地面积小于传统轮廓轮胎。分析原因是由于高硬度的支撑块增强了胎侧的刚性,以及断面水平轴至胎圈距离的增大共同使得轮胎胎冠的刚性增强,实现了轮胎翻转力臂的减小和真圆度的逼近,从而减小了轮胎的接地面积,因此三角平衡轮廓轮胎在滚动阻力方面表现较为优越。

不同轮廓轮胎接地断面接地压力和摩擦剪切应力分布如图9(a)和(b)所示。相比传统轮廓轮胎,三角平衡轮廓轮胎沿胎面横向方向接地区域内接地压力分布较为均匀,且摩擦剪切应力较小,因此三角平衡轮廓轮胎胎面的耐磨性较好,有效使用寿命较长。另外,三角平衡轮廓轮胎沿胎面横向方向接地

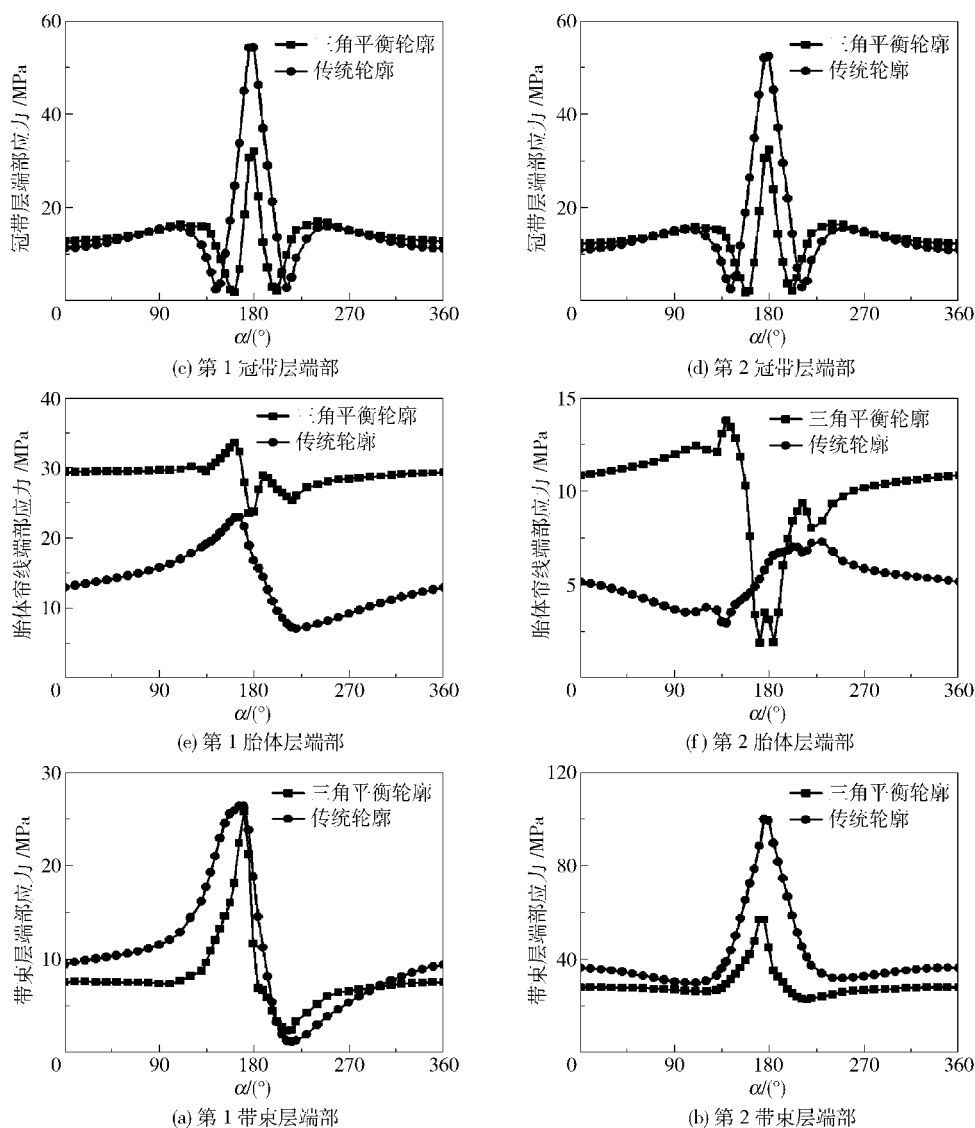


图 7 骨架材料端部周向受力分析

Fig. 7 Circumferential stress analyses of framework material ends

区域内摩擦剪切应力呈原点对称分布,而传统轮廓轮胎呈轴对称分布。

3.2.2 径向刚度

试验充气压力下轮胎下沉量-负荷曲线如图 10 所示。在试验充气压力为 0.22 MPa 和试验负荷为 5650 N 条件下,相比传统轮廓轮胎,三角平衡轮廓轮胎在相同载荷作用下,径向刚度较大,并随着径向载荷不断增大,三角平衡轮廓轮胎下沉量的增幅远远小于传统轮廓轮胎。分析原因是传统轮廓轮胎的径向刚度一般主要由充气压力决定^[11],而三角平衡轮廓轮胎的径向刚度主要由支撑块和充气压力共同决定,说明三角平衡轮廓轮胎的舒适性较差,而高速性较好,但轮胎行驶的舒适性可以通过调整车辆悬架

的缓冲和减震装置来得到提高。

4 结论

(1)相比传统轮廓轮胎,三角平衡轮廓轮胎的骨架材料在接地区域内沿胎面横向方向整体应力分布较均匀,接地印痕面积较小,实现了轮胎翻转力臂的减小和真圆度的逼近,具有较低的滚动阻力。

(2)三角平衡轮廓轮胎相比传统轮廓轮胎沿胎面横向方向接地区域内接地压力分布较均匀,且摩擦剪切应力较小,胎面的耐磨性较好。

(3)在相同试验条件下,三角平衡轮廓轮胎的径向刚度较高,说明其舒适性较差,而高速性较好。

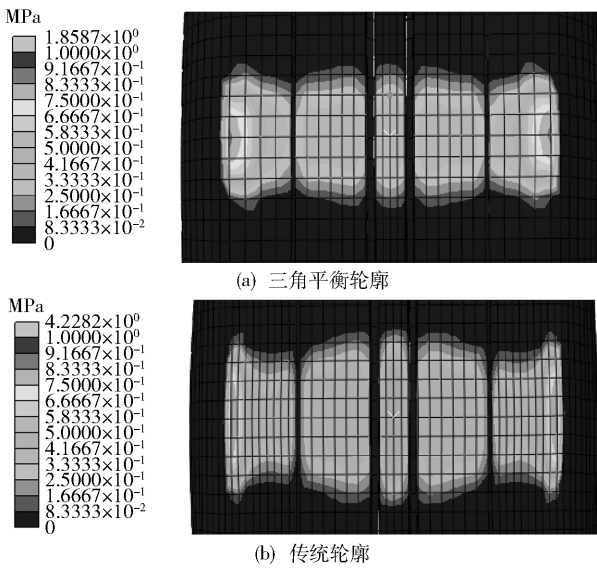


图 8 不同轮廓轮胎的接地印痕

Fig. 8 Footprints of different profile tires

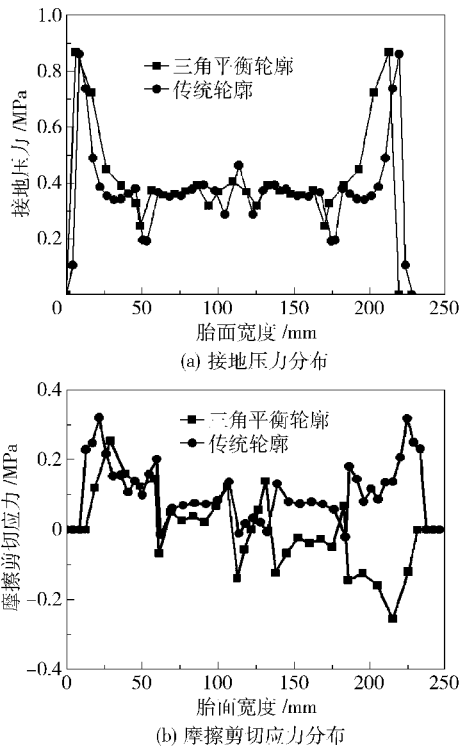


图 9 不同轮廓轮胎接地断面接地压力和摩擦剪切应力分布

Fig. 9 Grounding stress distribution and friction shear stress distribution of different profile tires in the grounding area

参考文献:

[1] Walter J D, Conant F S. Energy losses in tires[J]. Tire Science and Technology, 1974, 2(4): 235-260.

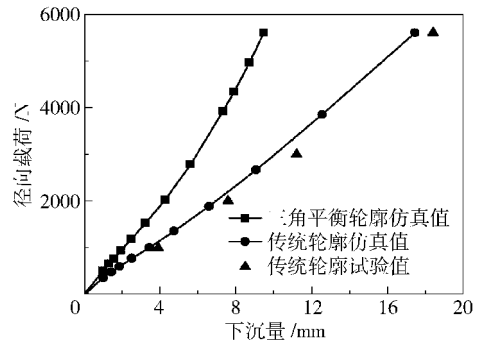


图 10 试验充气压力下轮胎下沉量-负荷曲线

Fig. 10 Plots of deflection against load at experimental inflation pressure for different profile tires

[2] Glemming D A, Bowers P A. Tire testing for rolling resistance and fuel economy[J]. Tire Science and Technology, 1974, 2(4): 286-311.

[3] Clark S K. Rolling resistance of pneumatic tires[J]. Tire Science and Technology, 1978, 6(3): 163-175.

[4] 李丽娟, 刘锋, 苏秀平, 等. 轮胎结构力学设计理论研究进展[J]. 轮胎工业, 2000, 20(10): 579-587.
Li L J, Liu F, Su X P, et al. Research progress on tire structure mechanics design theory [J]. Tire Industry, 2000, 20(10): 579-587. (in Chinese)

[5] 刘勇, 杨卫民. 轮胎结构设计理论研究进展[J]. 弹性体, 2001, 11(1): 45-49.
Liu Y, Yang W M. Research progress on tire structure design theory [J]. Elastomer, 2001, 11(1): 45-49. (in Chinese)

[6] 杨卫民. 轮胎设计与制造工艺创新的发展方向[J]. 轮胎工业, 2012, 32(9): 515-516.
Yang W M. Development direction of tire design and manufacturing technology innovation [J]. Tire Industry, 2012, 32(9): 515-516. (in Chinese)

[7] 李锋祥, 杨卫民. 轮胎滚动阻力模型研究进展[J]. 橡胶工业, 2008, 55(4): 251-254.
Li F X, Yang W M. Research progress on the tire rolling resistance model [J]. Rubber Industry, 2008, 55(4): 251-254. (in Chinese)

[8] 黄建龙, 解广娟, 刘正伟. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡胶工业, 2008, 55(8): 467-472.
Huang J L, Xie G J, Liu Z W. Finite element analysis of super elastic rubber materials based on Mooney-Rivlin model and Yeoh model [J]. Rubber Industry, 2008, 55(8): 467-472. (in Chinese)

[9] 李俊, 陈晓东, 张海, 等. 采用 ABAQUS 对聚氨酯/橡胶复合轮胎应力场的有限元分析[C]//中国聚氨酯工

- 业协会. 中国聚氨酯工业协会第十五次年会论文集, 上海, 2010: 420-423.
- Li J, Chen X D, Zhang H, et al. Finite element analysis of compound tire stress field of polyurethane/rubber using ABAQUS [C]// Chinese Polyurethane Industry Association. The Fifteenth Annual Meeting Proceedings of Chinese Polyurethane Industry Association, Shanghai, 2010: 420-423. (in Chinese)
- [10] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 94.
- Shi Y P, Zhou Y R. Finite element analysis instances details of ABAQUS [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 94. (in Chinese)
- [11] 贺海留, 刘欣然. 影响轿车子午线轮胎静态径向刚度的因素[J]. 轮胎工业, 2004, 24(6): 359-362.
- He H L, Liu X R. Influence factor about static radial stiffness of car radial tire [J]. Tire Industry, 2004, 24(6): 359-362. (in Chinese)

Mechanical properties of the triangle equilibrium profile tire

XUE ZiChen HE JianYun YANG WeiMin JIAO ZhiWei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: With the aim of reducing the deformation of the tire body shape and hence reducing the tire rolling resistance, a new tire section profile which we call the triangle equilibrium profile was constituted by changing the section shape of a traditional tire. The properties of the new tire profile were compared with the traditional 255/30R22 tire profile as a reference. By using ABAQUS software, a three-dimensional finite element model of the triangle equilibrium profile tire was established, and the mechanical properties of the framework materials, tire footprint, contact pressure distribution and radial stiffness under static load conditions were analyzed. The results showed that, compared with the traditional tire, the overall levels of stress distribution along the transverse tread direction of the framework materials of the triangle equilibrium profile tire in the ground area were more homogeneous. In addition the deformations of the first carcass ply end, the second belt end, and the two cap layer ends of the triangle equilibrium profile tire were smaller, whilst the deformation of the second carcass ply end was larger. The lower grounding footprint areas and higher radial stiffness of the triangle equilibrium profile tire made the flip arm decrease and the approximate roundness achieved the aim of reducing the rolling resistance.

Key words: triangle equilibrium profile; rolling resistance; nonlinear finite element analysis; support block