

新型子午斜交轮胎结构设计与力学性能研究

薛梓晨^{1,2}, 贺建芸^{1,2}, 邓世涛^{1,3}, 阎华^{1,2}, 焦志伟^{1,2}, 杨卫民^{1,2*}

(1. 轮胎设计与制造工艺国家工程实验室, 北京 100029; 2. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029; 3. 三角轮胎股份有限公司, 山东 威海 264200)

摘要: 提出一种新型子午斜交轮胎胎体结构, 利用有限元软件Abaqus建立三维有限元模型, 并对其接地性能和骨架材料力学性能进行分析。研究表明, 子午斜交轮胎结构通过提高胎侧径向刚性和控制胎肩变形, 减小了胎肩的应力集中, 改善了轮胎接地压力分布均匀性, 避免了轮胎断面轮廓畸变, 有利于提高轮胎的承载性能、耐磨性能和操控性能。

关键词: 子午斜交轮胎; 子午线轮胎; 结构设计; 力学性能

中图分类号: U463.341⁺.6; TQ336.1; O241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8171(2016)03-0136-06

目前汽车和飞机所使用的轮胎结构主要有斜交轮胎和子午线轮胎两种类型(如图1所示)。两者在结构上的主要区别是: 1) 子午线轮胎胎体帘线打破传统斜交轮胎的交叉排列, 采用互相平行沿子午方向排列, 其主要作用是保持轮胎断面形状和承受由径向负荷产生的横向拉伸应力; 2) 子午线轮胎胎体与胎面之间周向设置高强度、小伸张的织物帘线或钢丝帘线组成的环状带束层, 而不是斜交轮胎的缓冲层。带束层帘线相对胎冠中心线呈小角度交叉分层排列, 其主要作用是约束胎体, 限制其周向变形, 从而增强轮胎周向刚度和侧向刚度^[1-2]。1946年法国米其林公司发明了子午线轮胎^[3], 从此子午线轮胎开始逐渐取代斜交轮胎, 子午线轮胎优点为减震性能、耐磨性能、抓着性能和使用性能好; 缺点为侧向稳定性较差、胎侧易裂口和制造工艺复杂等。



(a) 子午线轮胎

(b) 斜交轮胎

图1 子午线轮胎和斜交轮胎结构示意图

作者简介: 薛梓晨(1989—), 男, 甘肃金昌人, 硕士, 从事轮胎结构设计与仿真模拟研究。

*通信联系人

轮胎扁平化是子午线轮胎的一个发展趋势, 然而扁平率的减小容易引起轮胎接地压力分布不均匀, 从而造成轮胎不均匀磨损和胎肩应力集中。为了解决这个问题, 目前的研究主要集中在轮胎胎冠形状和带束层结构优化等方面^[4], 对于轮胎胎体结构优化方面的研究甚少。

1 子午斜交轮胎

新型子午斜交轮胎胎体结构的设计灵感来源于子午线轮胎和斜交轮胎的胎体结构特点, 以低扁平率的255/30R22子午线轮胎为研究对象, 进行胎体结构设计, 并通过有限元分析对比不同胎体结构的轮胎。子午线轮胎的胎体结构见图2, 位于胎冠和胎侧部位的2层胎体帘线均沿子午线方向铺设。为了改善胎面接地压力分布均匀性和避免轮胎断面轮廓畸变, 提出一种新型子午斜交轮胎胎体结构, 见图3。其中位于胎冠部位的2层胎体帘线沿子午线方向铺设, 使得胎冠部位胎体结构呈相互平行交错层叠状, 相比斜交轮胎, 提高了轮胎的高速性能, 使轮胎更容易实现低扁平率, 从而提高轮胎的操控稳定性; 位于胎侧部位的2层胎体帘线铺设方向与子午线方向有一定夹角, 使得胎侧部位的胎体结构呈相互交错网状层叠状, 有效地增强了胎侧部位的承载能力和操控性能, 并防止轮胎气压不足时胎侧部位的胎体层结构反复屈挠变形导致生热过大。由于带束层是子午线轮胎的主要受力构件, 其特点是强度高和周向伸长小, 可

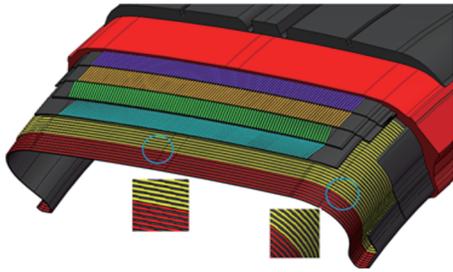


图2 子午线轮胎胎体结构示意图

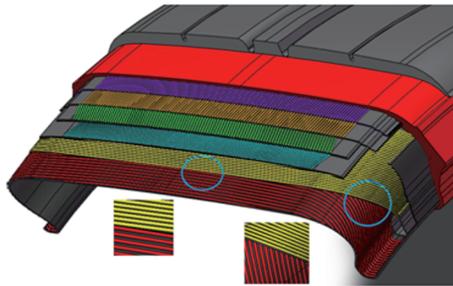


图3 子午斜交轮胎胎体结构示意图

承担周向应力和径向应力,因此子午斜交轮胎选用这种坚固的带束层结构达到箍紧胎体的作用。

2 子午斜交轮胎的有限元分析

2.1 有限元模型的建立

利用Abaqus有限元软件建立规格为255/30R22的子午斜交轮胎有限元模型,仅考虑纵向花纹沟,并选用型号为9J轮辋进行装配,三维模型利用symmetric model generation功能由二维模型旋转产生,如图4所示。橡胶部分采用CGAX3H和CGAX4H单元模拟,橡胶-帘线部分采用SFMGAX1单元模拟^[5]。

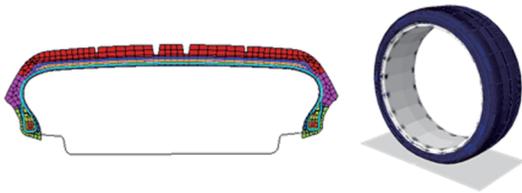


图4 子午斜交轮胎有限元模型

2.2 材料模型

橡胶是一种复杂的具有不可压缩性质的高度非线性超弹性材料,在变形过程中体积几乎不变,其力学行为对温度、应变历史、加载速率等十分敏感。工程上常用的本构模型^[6]有Mooney-Rivlin和Yeoh模型,本研究采用Yeoh模型描述橡胶的力学

性能。这是因为Yeoh模型可描述随变形而变化的剪切模型的橡胶,还可对复杂变形的力学行为进行预测,不仅描述变形范围较宽,而且适合于模拟大变形。

所选用的骨架材料包含2层锦纶冠带层、2层钢丝带束层和2层聚酯胎体帘布层。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。橡胶-帘线复合材料采用Rebar layer模型^[7],帘线一般与圆周方向之间有一定的夹角,称为铺设角,两种不同轮胎骨架材料帘线铺设角度的对比如表1所示。

表1 不同轮胎骨架材料帘线铺设角度的对比 (°)

位置	子午斜交轮胎	子午线轮胎
冠带层帘线	±90	±90
带束层帘线	±64	±64
胎冠部位胎体层帘线	0	0
胎侧部位胎体层帘线	±60	0
胎圈部位钢丝圈帘线	90	90

2.3 接触算法和边界条件

预测接触负荷作用下应力和应变的状态是轮胎分析的一个重要方面,常用的方法有Lagrange 乘子法、罚函数法、混合法以及基于求解器的直接约束法^[8],综合考虑计算时间、计算效率等因素,采用罚函数法求解接触问题。胎圈与轮辋之间的摩擦因数设为0.35,胎面与地面之间的摩擦因数设为0.5。另外,轮辋和地面定义为解析刚体。标准负荷工况:充气压力 290 kPa,额定负荷 5 520 N。

3 分析与讨论

3.1 静态接地试验验证

在试验充气压力为220 kPa、负荷为5 650 N条件下,不同轮胎有限元仿真结果与试验结果的对比见表2。由表2可见,仿真值与试验值误差控制

表2 有限元仿真结果与试验结果对比

项目	子午线轮胎		子午斜交轮胎 仿真值
	仿真值	试验值	
印痕面积/cm ²	224.8	216.2	223.8
下沉量/mm	17.6	18.6	13.2
接地长度/mm	124	123	144
接地宽度/mm	223	215	219

在6%范围内,满足工程要求,因此可利用该模型和分析方法进行轮胎力学性能研究。

为进一步验证模型的正确性,利用Tekscan压力分布测试系统对轮胎接地压力分布进行测试。255/30R22子午线轮胎接地压力分布的有限元分析与试验结果对比如图5所示。由图5可以看出,有限元仿真结果与试验结果具有良好的—致性。

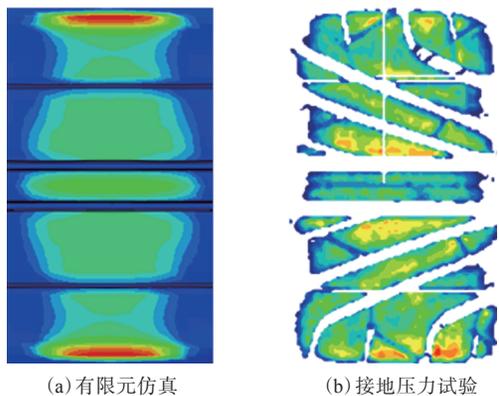


图5 子午线轮胎接地压力分布有限元仿真与试验对比

在试验充气压力和负荷条件下,轮胎下沉量—径向负荷曲线如图6所示。由表2和图6可知,相比子午线轮胎,子午斜交轮胎在相同负荷作用下接地印痕面积相差不大,而下沉量明显减小,极值之差为4.4 mm,说明子午斜交轮胎径向刚度较大,从而证明子午斜交轮胎胎体结构使轮胎的承载性能得到提升。

3.2 轮胎接地性能分析

两种不同胎体结构轮胎在标准负荷下接地印

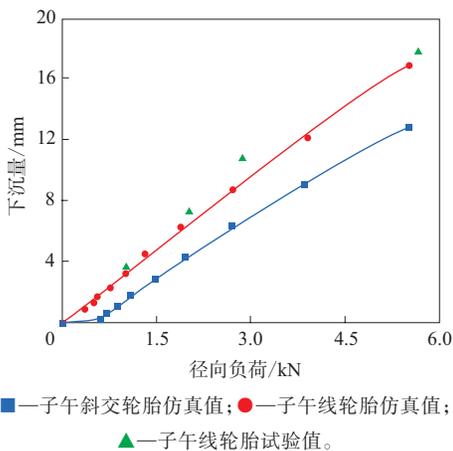
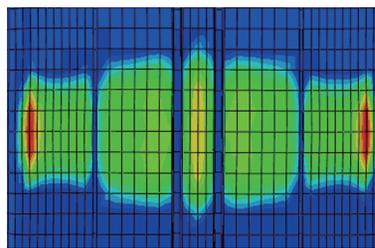
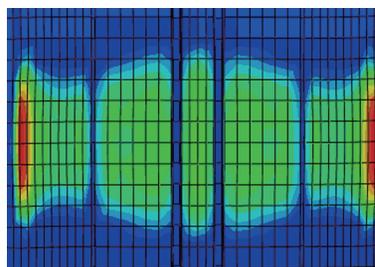


图6 轮胎下沉量—径向负荷曲线

痕和接地压力分布分别如图7和8所示。由图7和8可知:子午线轮胎的接地印痕呈“花瓶型”,胎面中心及胎肩处的接地压力较大,在使用过程中容易导致胎肩偏磨;子午斜交轮胎的接地印痕呈椭圆形,接地压力均匀性明显改善,接地印痕形状更为合理^[9],可提升轮胎耐磨性能。分析原因认为,子午斜交轮胎胎体结构提高了胎侧刚性,有效地控

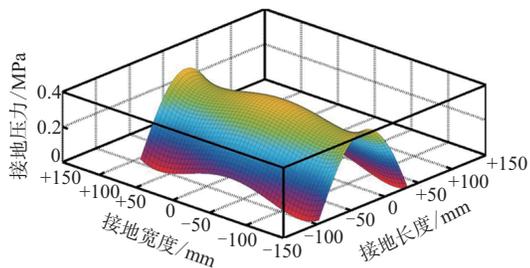


(a) 子午斜交轮胎

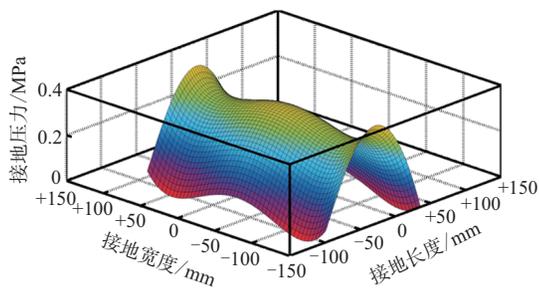


(b) 子午线轮胎

图7 轮胎接地印痕



(a) 子午斜交轮胎



(b) 子午线轮胎

图8 轮胎接地压力分布

制了胎肩处的变形,使过大的胎肩应力转移至胎面中央,有效减轻了易磨损胎肩的负担。

3.3 轮胎骨架材料力学性能分析

轮胎帘布端部在使用过程中经常出现损坏,其原因通常是胎体反包端点脱层、带束层端点脱层和胎肩脱层,这是由于橡胶材料与橡胶基复合材料的界面破坏所引起的,因此对轮胎骨架材料的力学性能进行分析十分必要^[10]。

3.3.1 胎体帘线铺设角度对骨架材料的影响

胎侧部位胎体帘线铺设角度对轮胎骨架材料沿胎面横向受力的影响如图9所示。由图9可知:随着胎侧部位胎体帘线铺设角度的增大,子午斜交轮胎胎冠部胎体帘线和带束层帘线受力减小,且减小幅度较小;而胎侧部位胎体帘线在带束层末端位置附近和胎肩部的受力增大,且增大幅度较大。另外,为了维持较为稳定的胎体层断面轮廓,带束层不断地对胎体层变形进行束缚,使得带束层钢丝帘线在胎肩部附近受力不断增大。

3.3.2 骨架材料受力分析

两种轮胎骨架材料在接地区域内沿轮胎横向受力分析如图10所示。由图10可知:相比子午线轮胎,子午斜交轮胎的胎体应力在接地区域内沿轮胎横向分布更加均匀,胎冠中央附近整体应力较高,而位于胎肩部带束层端部附近第1胎体层帘线应力较低,而第2胎体层帘线应力较高,这与子午线轮胎胎体帘线受力规律正好相反;子午斜交轮胎的带束层帘线应力在胎冠中央附近较低,而在胎肩附近较高,且带束层端部应力也较高,说明子午斜交轮胎胎侧部呈相互交叉网状的胎体结构,有效地增强了胎侧刚性,使胎侧部的胎体层更多地承担负荷,减小了胎肩和胎侧的变形,从而改善接地印痕形状。

两种轮胎胎体帘线端部沿轮胎周向受力分析如图11所示,其中 α 为骨架材料端部沿轮胎周向的旋转角度。由图11可见:子午斜交轮胎在接地区域内的胎体帘线端部应力极值之差高于子午线轮

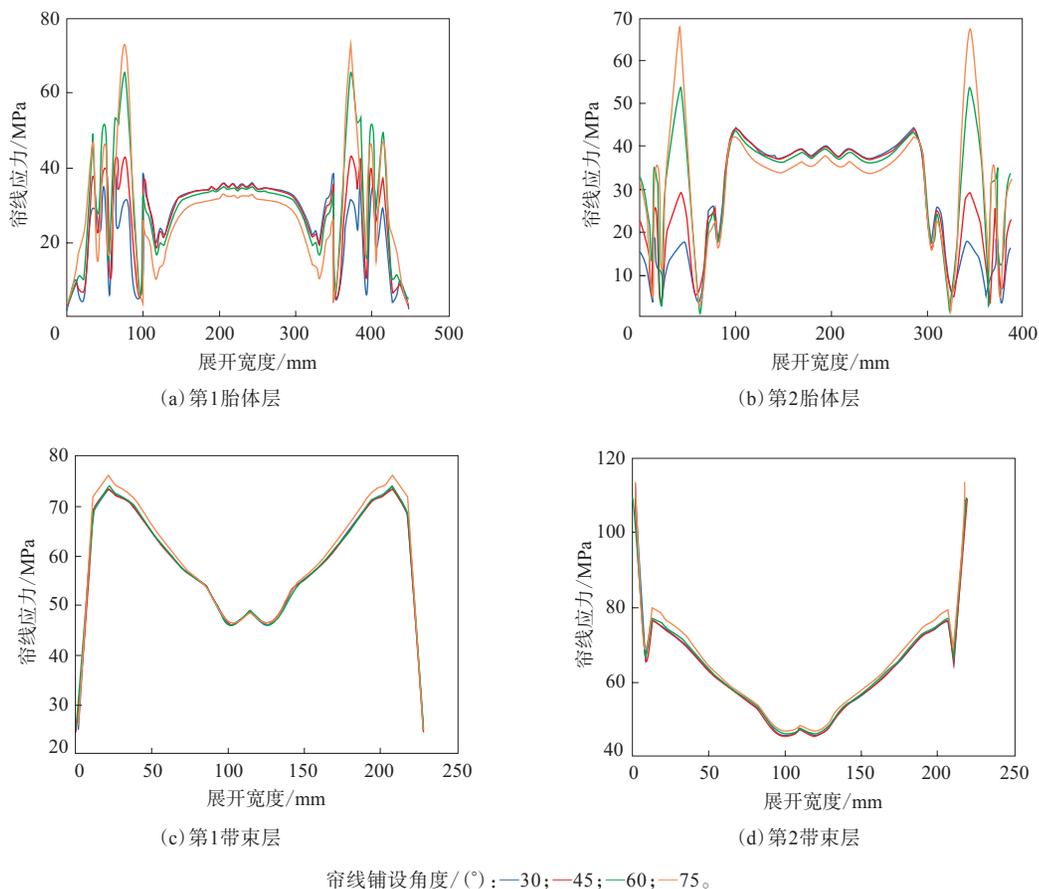


图9 胎侧部位胎体帘线铺设角度对骨架材料沿胎面横向受力的影响

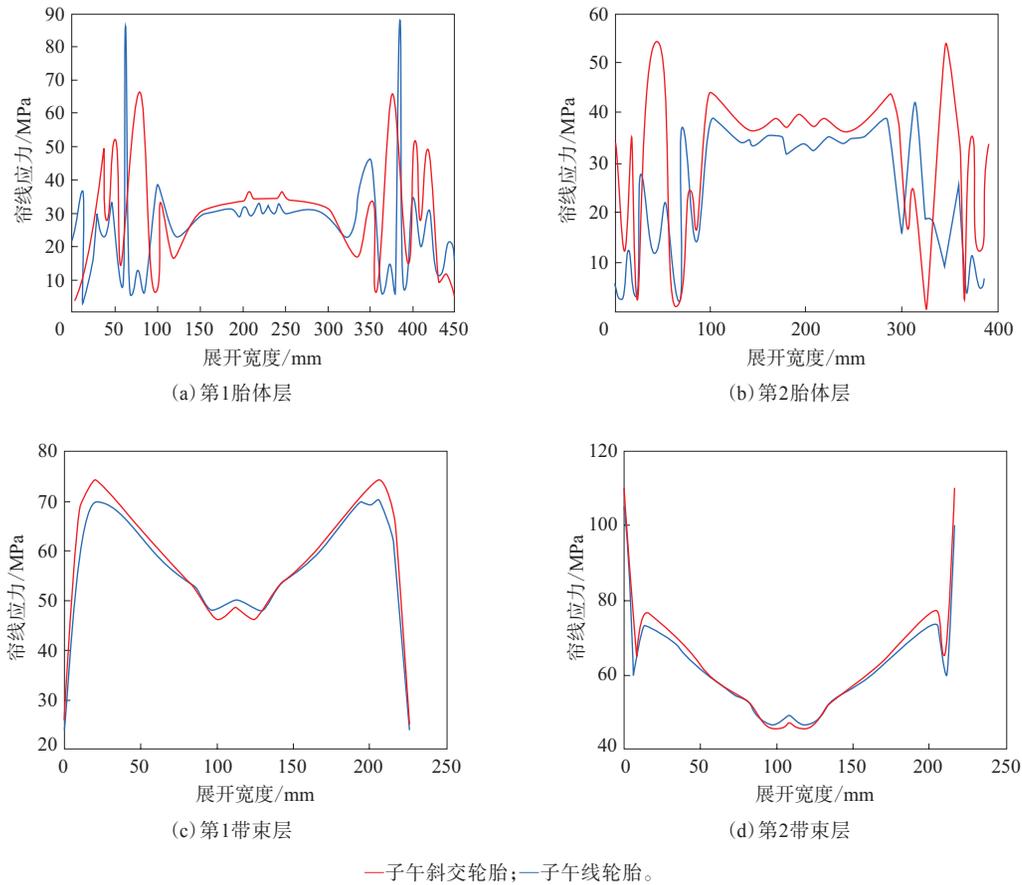
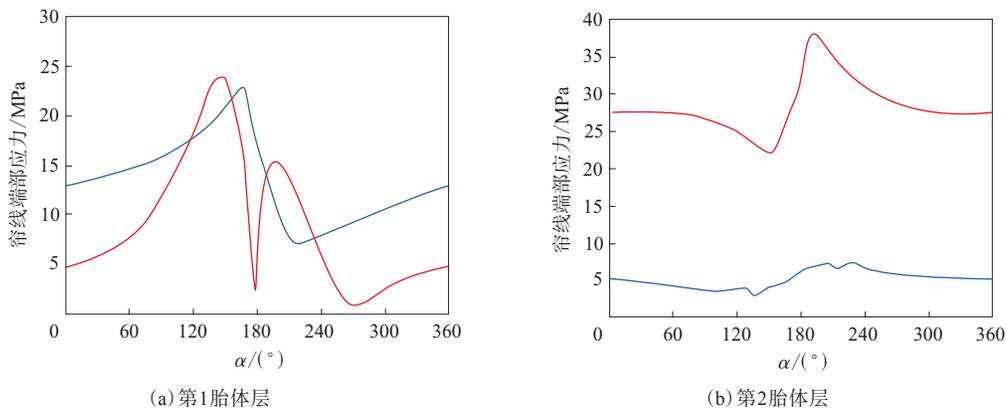


图10 轮胎骨架材料在接地区域内沿轮胎横向受力分析



注同图10。

图11 胎体帘线端部沿轮胎周向受力分析

胎,说明子午斜交轮胎胎体帘线端部在接地区域内的变形较大;子午斜交轮胎的第1胎体层帘线端部在接地区域内发生了2次应力突变,且在非接地区域内的帘线端部受力明显低于子午线轮胎,而第2胎体层帘线端部整体应力明显高于子午线轮胎。

4 结论

(1) 相比子午线轮胎,子午斜交轮胎径向刚度较高,说明子午斜交轮胎胎体结构可提高轮胎的承载性能。

(2) 子午斜交轮胎的接地印痕呈椭圆形,相对

于子午线轮胎其接地压力均匀性明显改善,接地印痕形状更为合理,避免了病态的“花瓶型”接地印痕。

(3) 子午斜交轮胎胎侧部胎体帘线铺设角度的增大,可减小胎冠部胎体帘线和带束层帘线的受力和增大胎侧部的胎体帘线受力。

(4) 子午斜交轮胎胎体帘线应力在接地区域内分布更加均匀,减小了胎肩在接地过程中的变形。

(5) 子午斜交轮胎带束层应力在接地区域内分布更加均匀,提升了胎冠刚度分布均匀性,增大了胎冠在接地区域内的纵向变形。

(6) 子午斜交轮胎胎体结构增大了接地区域内胎体帘线端部变形,且第1胎体层帘线端部在接地区域内发生了2次变形,提高了胎侧的缓冲性能。

参考文献:

[1] 刘哲义. 子午线轮胎的结构特征及其性能分析[J]. 专用汽车, 1992

(4): 53-57.

[2] 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]. 武汉: 中国科学技术大学, 2003.

[3] 杨卫民. 轮胎设计与制造工艺创新的发展方向[J]. 橡塑技术与装备, 2013, 39(2): 20-27.

[4] 王国林, 马银伟, 梁晨, 等. 仿蝗虫脚掌的子午线轮胎胎冠结构设计[J]. 机械工程学报, 2013, 49(12): 131-135.

[5] 陈芳. 基于rebar单元的载重子午线轮胎有限元分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2007.

[6] 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.

[7] 何志刚, 董大鹏, 王国林, 等. 轮胎超弹性本构材料参数确定的影响因素分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(12): 296-302.

[8] 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.

[9] Liang C, Wang G L, An D F, et al. Tire Wear and Footprint Geometrical Characters of Truck and Bus Radial Tires[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(3): 506-511.

[10] 陈芳, 王国林, 高先进, 等. 载重子午线轮胎帘线受力有限元分析[J]. 橡胶工业, 2008, 55(2): 80-84.

收稿日期: 2015-10-16

Structure Design and Mechanical Properties of New Radial-Bias Tire

XUE Zichen^{1,2}, HE Jianyun^{1,2}, DENG Shitao^{1,3}, YAN Hua^{1,2}, JIAO Zhiwei^{1,2}, YANG Weimin^{1,2}

(1. National Engineering Laboratory of Tire Design and Manufacturing Process, Beijing 100029, China; 2. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 3. Triangle Tire Co., Ltd, Weihai 264200, China)

Abstract: A new structure of radial-bias tire carcass was discussed in this paper. A three-dimensional finite element model of the radial-bias tire was established using Abaqus and the grounding performance of the tire and mechanical properties of the reinforcement materials were analyzed. The results showed that, by improving the radial stiffness of sidewall and controlling deformation of shoulder, the shoulder stress concentration of radial-bias tire could be reduced, the uniformity of tire ground pressure distribution was improved, and the distortion of tire cross-section profile could be avoided, which could enhance tire load capacity, wear resistance and steering performance.

Key words: radial-bias tire; radial tire; structure design; mechanical property

一种耐拉伸轮胎橡胶材料及其制备方法

中图分类号: TQ336.1; U463.341 文献标志码: D

由苏州国泰科技发展有限公司申请的专利(公开号 CN 105037828A, 公开日期 2015-11-11)“一种耐拉伸轮胎橡胶材料及其制备方法”, 涉及的耐拉伸轮胎胶料配方为天然橡胶 60, 丁苯橡胶 20~40, 炭黑 40~60, 过氧乙

酸 15~35, 碳纳米管 15~25, 纳米氧化铝 10~20, 乙烯-醋酸乙烯共聚物 1~7, 偶联剂 3~7, 二甲基二硫代氨基甲酸锌 0.5~1.5, 二氧化硅 10~20, 硫化剂 5~15。相对现有技术, 本发明耐拉伸轮胎胶料制备工艺简单, 成本低, 而且耐拉伸性能得到进一步提高。

(本刊编辑部 马晓)