基于Abaqus的轮胎接地印痕优化分析

傅相诚，张伟伟，车明明，隋永强
[浦林成山（青岛）工业研究设计有限公司，山东 青岛 266042]

摘要：采用有限元方法研究带束层角度、冠带层结构和冠弧尺寸对轮胎接地印痕形状的影响。结果表明：带束层角度对接地印痕形状影响较小；采用肩部缠绕的冠带层结构能够很大程度地改善接地印痕内凹的现象；调整冠弧尺寸能够有效改善接地印痕的压力分布状况；仿真结果与试验结果吻合，接地印痕优化后的轮胎滚动阻力减小。

关键词：子午线轮胎；接地印痕；有限元分析；结构优化
中图分类号：U463.341^{+}.6；O241.82 **文章编号**：1006-8171（2019）06-0330-04
文献标志码：A **DOI**：10.12135/j.issn.1006-8171.2019.06.0330

轮胎是传递车辆与路面相互作用的部件，轮胎的性能直接影响车辆的乘坐舒适性、操控性和安全性。而轮胎的接地印痕直接影响轮胎的干湿地抓着力、噪声和耐磨性能，因此轮胎的印痕在设计过程中十分重要。在轮胎设计初始阶段，采用有限元方法对轮胎印痕进行分析能大幅提高产品开发效率，并且减少研发成本。

本工作采用Abaqus有限元软件对轮胎接地印痕进行优化。

1 优化对象

以新开发的165/65R15规格轮胎为研究对象，根据接地印痕测试标准对首轮试制的轮胎进行接地印痕测试，结果如图1所示。

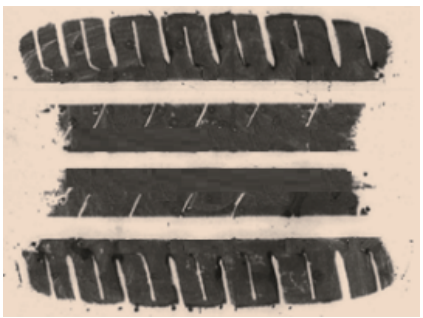


图1 原始方案接地印痕

作者简介：傅相诚（1986—），男，山东青岛人，浦林成山（青岛）工业研究设计有限公司工程师，主要从事轮胎参数化设计及轮胎性能仿真分析工作。
E-mail：xcfu@prinxchengshan.com

由图1可见，轮胎接地印痕呈哑铃形，未达到理想形状。在制作模具前进行有限元分析，优化轮胎结构，以达到理想的接地印痕形状。

2 有限元仿真模型

选用有限元分析软件Abaqus进行轮胎的充气和加载分析。根据轮胎材料及各部件的力学特性，选用Yeoh本构模型对橡胶材料进行描述，骨架材料如胎体、带束层以及冠带结构选用Rebar单元定义[1]。

二维充气模型中，橡胶材料的单元类型分别采用CGAX3H和CGAX4H，骨架材料的单元类型采用SFMGAX1。三维加载分析中，橡胶材料分别采用杂交单元C3D6H和C3D8H[2]。为节约计算成本，有限元模型只考虑轮胎花纹纵沟，简化了花纹的横沟和细小钢片。

2.1 骨架材料有限元模型

轮胎骨架材料在充气和加载过程中承受了大部分负荷，而且在工作状态下主要承受张力。由于胎体帘线和冠带层帘线都是由多股锦纶丝捻制而成，拉伸状态下能够保持正常的工作状态，但受压缩后极易松散。仿真过程中，限于纤维材料的压缩模量很难测试，故多数仿真都不定义纤维材料的压缩模量，导致帘线模型在仿真过程出现如图2所示的失稳现象，进而导致橡胶单元出现褶皱，影响仿真的精度[3]。

针对此问题，结合Abaqus软件的子程序功能，

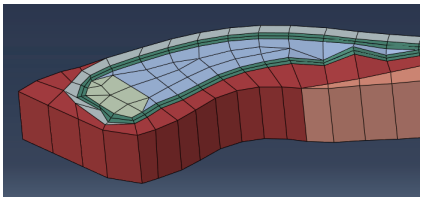


图2　帘线单元失稳

建立帘线拉伸、压缩材料子程序UMAT，使帘线的模型更加合理。帘线模量(E)数学模型为

$$E=\frac{\pi}{2}\arctan\left(K\Delta\varepsilon\right)\times\frac{E_1-E_2}{2}+\frac{E_1+E_2}{2}$$

式中，$\Delta\varepsilon$为应变变化量，E_1为拉伸模量，E_2为压缩模量，K为经验参数。

2.2　原方案印痕分析结果

使用建立的轮胎橡胶和骨架材料的有限元模型和原始方案的材料分布图，对原方案进行有限元分析，充气压力为250 kPa，径向负荷为4 528 N。接地印痕仿真结果如图3所示。对比发现，接地印痕的分析结果与实测形状基本一致，也间接验证了仿真模型的可靠性。

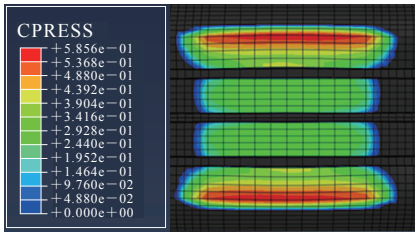
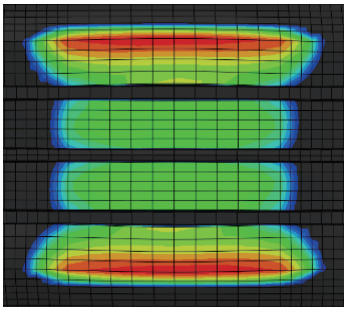
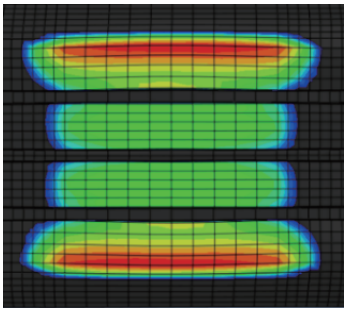


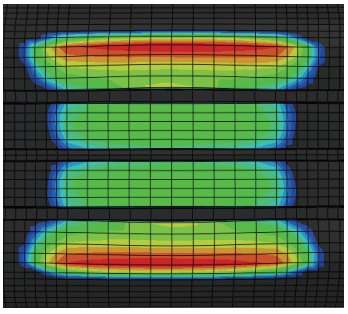
图3　原始方案接地印痕分析结果



(a)18°



(b)24°



(c)27°

图4　不同带束层角度的接地印痕

3　有限元优化分析

3.1　优化方案

接地印痕优化的过程中保证胎侧和胎圈部位的轮廓不变，主要从带束层角度、冠带层结构和冠弧尺寸3个方面调整[4]，并要求理想接地印痕下轮胎的滚动阻力及刚度性能变化在5%以内。主要参数调整如下。

(1)带束层角度。带束层裁断角度的变化直接影响着钢丝在周向和截面宽度方向的受力情况，进而影响胎冠横轴和纵轴方向的接地压力。带束层裁断角度减小，会增大轮胎周向的束缚力。分别对比18°，24°和27°三个方案接地印痕的变化情况，如图4所示。由图4可见，单一调整带束层角度，接地印痕未达到理想的形状。

图5　冠带层缠绕方式

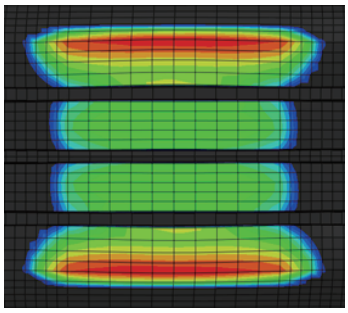
(2)冠带层结构。原始方案采用一层冠带层结构，缠绕方式如图5所示，试验得到的接地印痕形状呈哑铃状，故采用冠带层肩部缠绕结构以改善印痕中间内凹的现象，如图6所示。

(3)冠弧尺寸。轮胎的冠弧尺寸对接地印痕有着显著的影响，减小一段弧半径能够有效改善印痕内凹的现象，二段弧的半径大小很大程度影响接地印痕边缘的压力分布。原始设计方案中，一段弧半径(R_1)为450 mm，二段弧半径(R_2)为

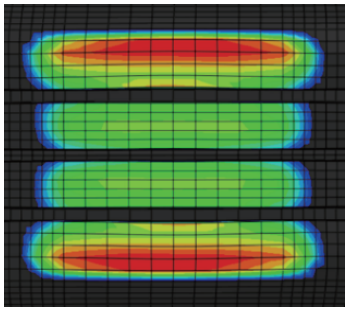
225 mm，根据冠弧尺寸变化对接地印痕形状的影响规律，结合冠带层肩部缠绕以及带束层24°裁断角度结构，最终选取R_1为400 mm，R_2为180 mm（见图7）。最终优化的接地印痕如图8所示。

综合以上分析结果可以看出：带束层角度变化对接地印痕形状影响较小；采用肩部缠绕的冠带层结构能够很大程度地改善接地印痕内凹的现象；调整冠弧尺寸能够有效改善接地印痕的压力分布状况。

胎面接地最大压强减小，使压力分布更加均匀，优化前后的接地印痕参数如表1所示。

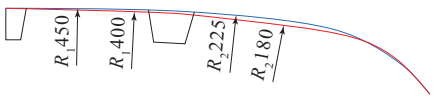


(a)一层缠绕



(b)肩部缠绕

图6 不同冠带层结构的接地印痕



—原方案；—优化方案。

图7 冠弧尺寸调整

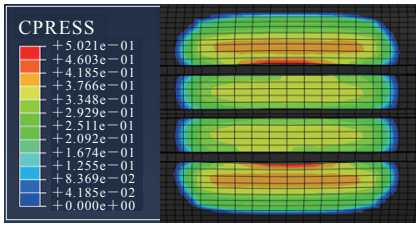


图8 优化后的接地印痕

表1 优化前后接地印痕参数

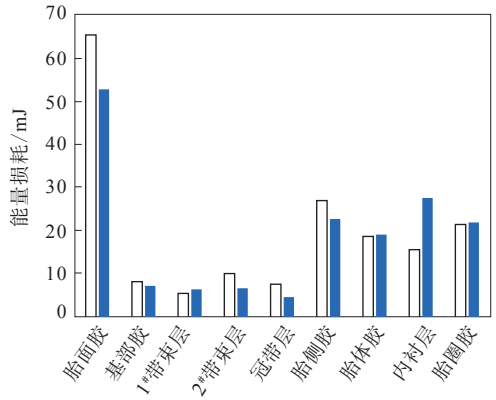
方案	接地面积/mm²	横轴长度/mm	纵轴长度/mm	最大压强/MPa
原始方案	13 382	122	123	0.586
优化方案	14 703	130	132	0.502

由表1可以看出，优化后轮胎的接地面积增大近10%，更有利于轮胎的抓着性能。

3.2 优化后轮胎性能

3.2.1 滚动阻力

轮胎的节油性能主要通过滚动阻力大小来表征，是轮胎设计阶段重点关注的性能之一。根据滚动阻力理论计算方法，得出轮胎各个半部件的能量损耗情况，如图9所示。



□—原方案；■—优化方案。

图9 能量损耗分布

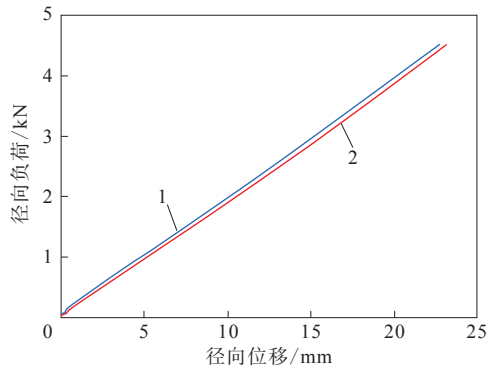
从图9可以看出，优化后对能量损耗贡献比较大的胎面和胎侧部分，能量损耗都有所下降，并且滚动阻力系数降低5.5%。

3.2.2 径向刚度

轮胎的径向刚度在一定程度上反映了轮胎的乘坐舒适性和承载能力，优化前后轮胎的刚度曲线如图10所示。原始方案的轮胎径向刚度的有限元分析结果为198.4 N·mm^{-1}，结构优化后，轮胎的径向刚度为194.9 N·mm^{-1}，降低范围不超过2%。

4 试验验证

根据优化后的冠带层结构和冠弧尺寸，调整施工和模具结构，对新试制的轮胎进行试验验证。试



1—原方案；2—优化方案。

图10　优化前后轮胎刚度曲线

验轮胎接地印痕如图11所示。

可以看出，轮胎的接地印痕基本呈方形，与仿真结果一致。

5　结论

采用有限元分析方法指导轮胎性能优化，能够缩短新产品的研发周期，降低研发成本。利用先进的优化方法，不仅能够完成单一目标优化，还能够实现多目标优化效果。

本工作优化的165/65R15规格轮胎，仿真结果与试验结果相吻合，得到了理想的接地印痕形状和更加均匀的压力分布，同时降低了滚动阻力。

图11　优化方案试验接地印痕

参考文献：

[1] 于海富，李凡珠，杨海波，等. 橡胶材料的混合高弹性本构模型研究[J]. 橡胶工业，2018，65(5)：509-513.

[2] 石亦平，周蓉. ABAQUS有限元分析实例详解[M]. 北京：机械工业出版社，2012.

[3] 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.

[4] 周涛，陈建国，陈忠茂，等. 跑气保用轮胎接地印痕的有限元分析与优化[J]. 轮胎工业，2010，30(10)：592-595.

收稿日期：2019-02-10

Analysis and Optimization of Tire Footprint Based on Abaqus

FU Xiangcheng，ZHANG Weiwei，CHE Mingming，SUI Yongqiang

[Prinxchengshan（Qingdao）Industrial Research and Design Co.，Ltd，Qingdao　266042，China]

Abstract：The influence of belt angles，overlays structure and crown arc size on the footprint of tire was investigated by finite element method. The results showed that，the belt angle had little effect on the shape of the footprint. The overlay structure with the shoulder wrap could greatly minimize the concave deflection of the footprint. Adjusting the crown arc size could effectively improve the pressure distribution of the footprint. The simulation results were consistent with the experimental results. The rolling resistance of the tire with the optimized footprint was decreased.

Key words：radial tire；footprint；finite element analysis；structure optimization

普利司通拟开发月球用轮胎

近日，日本普利司通株式会社宣布，该公司将参与丰田汽车和日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）共同开发月球车轮胎。据悉，在美国西部科罗拉多州召开的宇宙领域研讨会上，普利司通明确了这一消息。

普利司通表示，月球表面细小的石头多、环形山分布各地等条件使得月球车行驶条件非常严苛。该公司希望开发出一款既能支撑车体质量又能传递驱动力和刹车，同时能够应对路面变化、柔软且强有力的轮胎。

（摘自《中国化工报》，2019-04-18）