

辐板式聚氨酯轮胎的侧偏滚动性能研究

薛梓晨^{1,2}, 贺建芸^{1,2}, 杨卫民^{1,2}, 焦志伟^{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)

摘要:建立聚氨酯辐板与橡胶胎面相复合的辐板式聚氨酯轮胎模型, 并采用有限元软件 Abaqus 分析其在侧偏滚动状态下的力学性能、接地性能和操控性能。结果表明: 相比子午线橡胶轮胎, 辐板式聚氨酯轮胎胎面胶和带束层帘线的受力分布更均匀, 可有效避免带束层脱层现象的发生; 支撑板的上下两端及中部易发生疲劳损坏, 因此合理地设计支撑板结构十分必要; 侧偏刚度和回正刚度相差不大。

关键词:辐板式聚氨酯轮胎; 侧偏滚动; 接地压力分布; 有限元分析

中图分类号: TQ336.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8171(2015)08-0465-05

随着高分子材料的快速发展, 开发可替代橡胶轮胎的新型高分子材料轮胎是未来轮胎发展的趋势。目前新型高分子材料轮胎主要有非充气式聚氨酯蜂巢轮胎、聚氨酯实心轮胎、辐条式聚氨酯轮胎和辐板式聚氨酯轮胎等^[1]。其中辐板式聚氨酯轮胎的杰出代表产品为米其林公司在美国底特律市北美国际汽车博览会上展示的轮胎轮辋合二为一的整体式聚氨酯非充气“Tweel”轮胎(如图 1 所示)。这种新型轮胎优秀的减震功效和操控性能实现了重大的技术跨越。

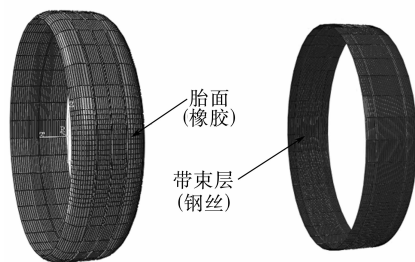


图 1 米其林“Tweel”轮胎

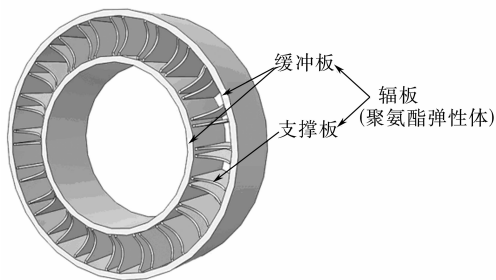
1 辐板式聚氨酯轮胎介绍

本工作设计规格为 155/65R13 的辐板式聚氨酯轮胎, 其主要由胎冠和辐板两部分组成。其中辐板包含 40 块支撑板和 2 块缓冲板, 支撑板与缓冲板的连接并非垂直设计, 而是具有 6° 的倾斜

角度, 支撑板的厚度为 4 mm。胎冠包含橡胶胎面和嵌入其中的 1 层钢丝带束层, 如图 2 所示。



(a) 胎冠



(b) 辐板

图 2 辐板式聚氨酯轮胎结构示意图

根据轮胎的性能要求, 胎冠和辐板需要选择合适的材料。由于聚氨酯弹性体具有优异的耐磨性能, 硬度范围宽, 具有高强度、高伸长率、高撕裂强度和大负载支撑容量以及很好的吸音减震效果等优点^[2], 且比金属更耐长期冲击, 能够起到冲压缓冲和弹簧的作用, 因此辐板选用热固型聚氨酯弹性体, 采用整体浇注式加工成型工艺, 生产工艺简单, 设备投资少, 成本低。胎冠选用可近似视为

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

不可压缩超弹性材料的橡胶材料。

2 有限元模型的建立

2.1 材料模型

通常采用超弹性模型描述橡胶材料的力学特性,由于 Yeoh 模型形式简单、精度较高,且仅由单轴拉伸试验即可确定其系数,因此采用 Yeoh 模型来描述胎冠部位的橡胶材料,其应变能密度函数描述为

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3$$
式中, W 为应变能密度; C_{10} 、 C_{20} 和 C_{30} 为材料常数^[3],通过单轴拉伸或压缩试验确定; I_1 为主伸长比的第一不变量。

辐板材料选用线弹性模型描述,其杨氏模量选用 130 MPa,泊松比根据材料特性选用 0.4^[4]。

2.2 接触算法和边界条件

常规充气轮胎的接触主要包括轮胎与地面的接触和胎圈与轮辋的接触,而辐板式聚氨酯轮胎的接触方式区别于常规充气轮胎,轮辋与辐板采用一体化组合方式,因此在建模过程中轮辋与辐板和胎面与辐板均采用 Tie 约束^[5]。轮胎与地面的接触问题属于带约束条件的泛函极值问题,最常用的方法有 Lagrange 乘子法、罚函数法以及基于求解器的直接约束法^[6-7],本工作采用罚函数法求解轮胎与地面的接触问题。由于轮胎与地面之间的摩擦因数受多种因素的影响,为了简化模型,选取胎面与地面之间的摩擦因数为 0.5,并将地面和轮辋简化为刚体。

2.3 有限元模型的网格划分

利用有限元软件 Abaqus 中的“symmetric model generation”功能,将胎面和通过 Embed 功能嵌入到其中的钢丝带束层的二维模型旋转为三维模型,在 CATIA 三维制图软件中绘制辐板,并将其导入 Abaqus 有限元分析软件中与胎面和钢丝带束层进行装配,并进行网格划分,如图 3 所示。轮胎胎面橡胶材料近似视为不可压缩材料,选用 8 节点的完全积分常压力杂交六面体单元;由于轮胎受载时辐板变形较大,网格存在扭曲变形,而 8 节点的六面体减缩积分实体单元在网格扭曲时分析精度不会受到很大影响,因此支撑板选用六面体减缩积分实体单元,并选用增强“沙

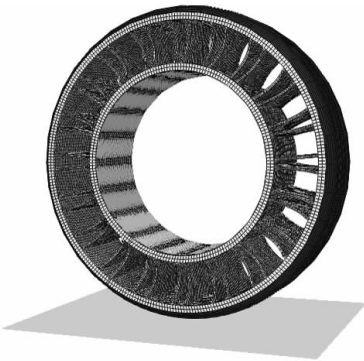


图 3 辐板式聚氨酯轮胎三维模型

漏”控制^[6]。

2.4 侧偏滚动工况

对辐板式聚氨酯轮胎和子午线橡胶轮胎施加竖直向下的标准负荷 3 000 N,轮胎行驶速度为 10 km · h⁻¹,侧偏角为 0°~8°,其中对子午线轮胎施加标准充气压力 250 kPa。

3 CAE 仿真分析结果

3.1 模型验证

对规格为 155/65R13 的普通轮胎进行检测,其中轮胎充气压力为 220 kPa、静负荷为 2 970 N。轮胎静负荷性能仿真结果与检测结果对比见表 1。由表 1 可见,仿真结果误差控制在 5% 范围内,满足工程要求,因此可用该模型和分析方法进行轮胎力学性能的研究。

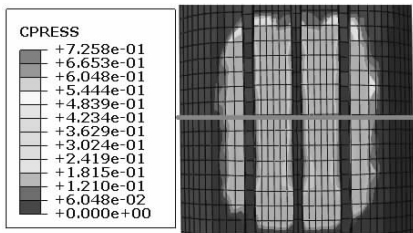
表 1 两种轮胎有限元仿真结果与试验结果的对比

项 目	仿真结果		检测 结果 ¹⁾
	辐板式聚氨酯轮胎	子午线橡胶轮胎	
印痕面积/cm ²	95.5	100.2	101.0
下沉量/mm	12.29	17.68	16.96

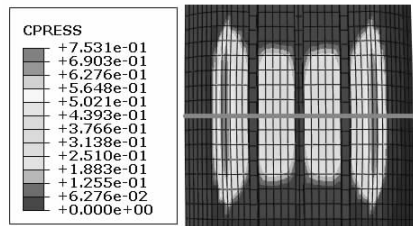
注:1)规格为 155/65R13 的普通轮胎检测结果。

3.2 接地性能分析

对比分析两种结构轮胎在不同侧偏角滚动状态下的接地性能,进行了侧偏滚动接地分析。两种轮胎不同侧偏角滚动状态下的接地印痕分别如图 4 和 5 所示。由图 4 和 5 可知:辐板式聚氨酯轮胎的接地印痕沿轮胎纵向分布,而子午线橡胶轮胎的接地印痕沿轮胎横向分布;随着侧偏角从 0°增大至 8°,轮胎接地印痕均向侧偏滚动的反方向一侧移动,其中辐板式聚氨酯轮胎的最大接地压力分布区域主要集中于胎肩附近的纵向沟槽,

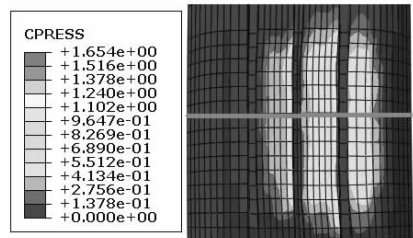


(a) 辐板式聚氨酯轮胎

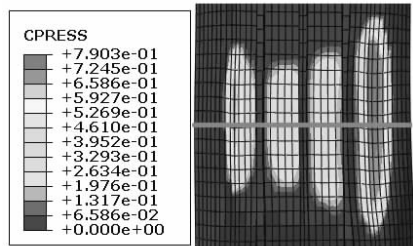


(b) 子午线橡胶轮胎

图 4 侧偏角为 0°时的轮胎接地印痕



(a) 辐板式聚氨酯轮胎



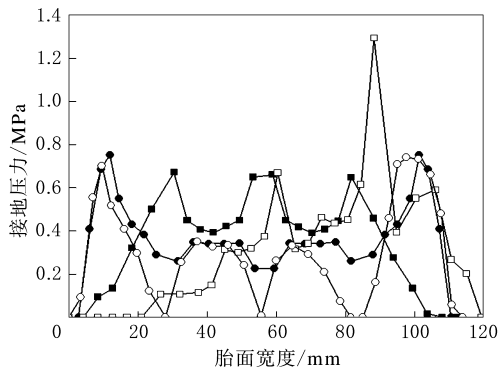
(b) 子午线橡胶轮胎

图 5 侧偏角为 8°时的轮胎接地印痕

而子午线橡胶轮胎的接地压力分布区域主要集中于两侧胎肩,且侧偏滚动反方向一侧的胎肩接地压力分布区域的集中程度明显大于另一侧。此外,在侧偏滚动状态下,辐板式聚氨酯轮胎的接地印痕面积与子午线橡胶轮胎相差不大,说明车辆在转弯过程中,辐板式聚氨酯轮胎在保证一定的抓着力条件下,有效地减轻了易磨损胎肩的负担,从而提高轮胎的使用寿命。

两种轮胎在侧偏角为 0°和 8°滚动状态下的胎面接地压力分布如图 6 所示。由图 6 可见,相

比子午线橡胶轮胎,随着侧偏角从 0°增大至 8°,辐板式聚氨酯轮胎沿侧偏滚动方向一侧胎肩的接地压力减小,而沿侧偏滚动反方向一侧纵向沟槽的接地压力增大,且增幅较大。



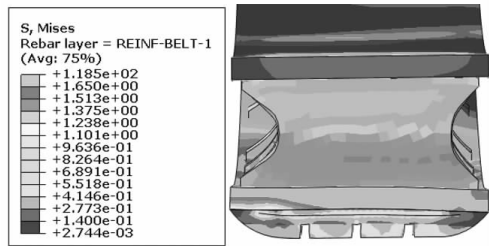
■—辐板式聚氨酯轮胎 0°侧偏角;●—子午线橡胶轮胎 0°侧偏角;□—辐板式聚氨酯轮胎 8°侧偏角;○—子午线橡胶轮胎 8°侧偏角。

图 6 轮胎接地压力分布

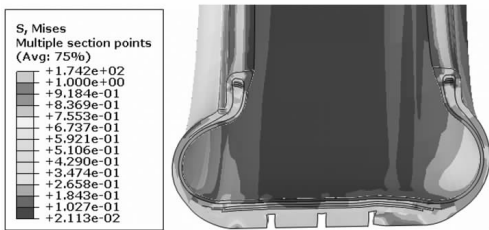
3.3 力学性能分析

两种轮胎在侧偏角为 8°时滚动状态下的接地断面应力分布如图 7 所示。由图 7 可见,相比子午线橡胶轮胎,辐板式聚氨酯轮胎的应力极值分布主要集中于支撑板与与胎面相连的缓冲板,胎面胶和带束层帘线的受力分布更均匀,且带束层端部的应力集中程度较低。

两种轮胎在侧偏角为 8°时滚动状态下辐板



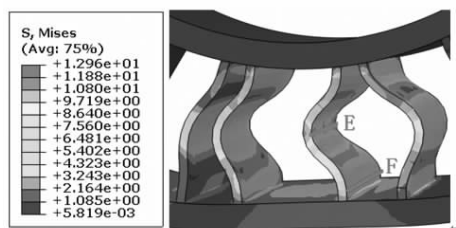
(a) 辐板式聚氨酯轮胎



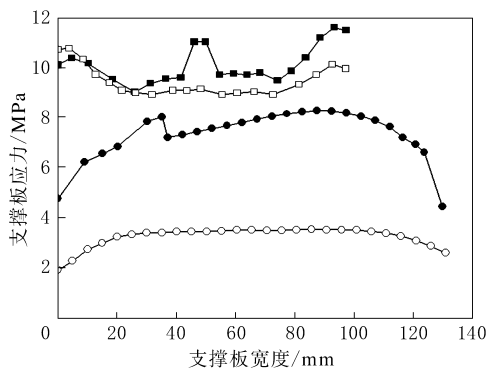
(b) 子午线橡胶轮胎

图 7 侧偏滚动状态下轮胎接地断面应力分布

受力分析如图8所示。由图8可见,相比子午线橡胶轮胎,随着侧偏角从 0° 增大至 8° ,辐板式聚氨酯轮胎支撑板弯曲变形最大部位的应力分布沿轨迹E呈一端降低,中间和另一端增大的趋势,而支撑板下端应力分布沿轨迹F显著增大。说明在侧偏滚动状态下辐板式聚氨酯轮胎的支撑板上下两端及中部容易发生疲劳损坏,因此合理设计支撑板的结构十分必要。



(a) 辐板受力



(b) 支撑板应力分布

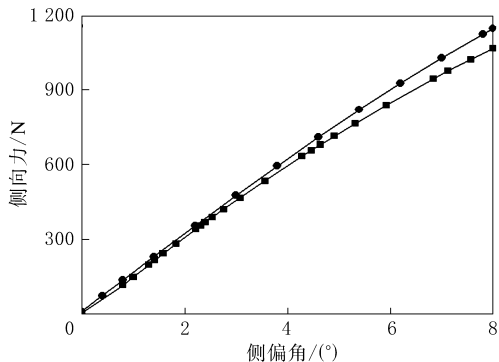
■—辐板式聚氨酯轮胎 8° 侧偏角; ●—子午线橡胶轮胎 8° 侧偏角;
□—辐板式聚氨酯轮胎 0° 侧偏角;
○—子午线橡胶轮胎 0° 侧偏角。

图8 辐板受力分布

3.4 操控性能分析

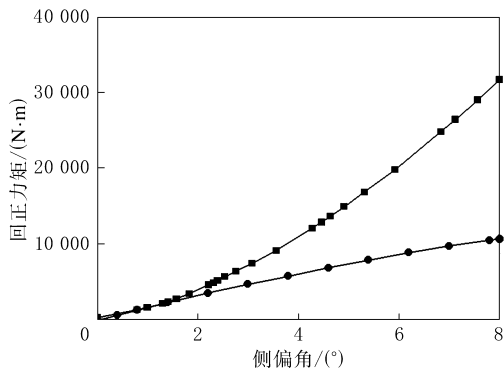
两种轮胎在侧偏滚动状态下的侧向力与侧偏角的关系曲线如图9所示。由图9可见,侧向力与侧偏角近似呈线性关系,表明侧偏角在 $0^\circ \sim 8^\circ$ 范围内两种轮胎在接地区域内未发生较为明显的侧滑现象。辐板式聚氨酯轮胎的侧偏刚度略小于子午线橡胶轮胎。

两种轮胎在侧偏滚动状态下的回正力矩与侧偏角的关系曲线如图10所示。由图10可见:当侧偏角较小时,回正力矩随着侧偏角的增大而单调增大,且两种轮胎的回正力矩相差不大;当侧偏角较大时,辐板式聚氨酯轮胎的回正力矩逐渐开



■—辐板式聚氨酯轮胎; ●—子午线橡胶轮胎。

图9 侧向力与侧偏角关系曲线



注同图9。

图10 回正力矩与侧偏角关系曲线

始大于子午线橡胶轮胎,且增大幅度越来越大。另外,辐板式聚氨酯轮胎的回正刚度与子午线橡胶轮胎相差不大。

4 结论

(1) 辐板式聚氨酯轮胎与子午线橡胶轮胎接地印痕面积相差不大,辐板式聚氨酯轮胎在保证一定的抓着力条件下,可有效减轻易磨损胎肩的负担,从而提高胎面胶的使用寿命。

(2) 相比子午线橡胶轮胎,辐板式聚氨酯轮胎的应力极值分布主要集中于支撑板和与胎面相连的缓冲板,胎面胶和带束层帘线的受力分布更均匀,且带束层端部的应力集中程度较低,可有效避免带束层脱层现象的发生。

(3) 辐板式聚氨酯轮胎支撑板的上下两端及中部易发生疲劳损坏,因此合理地设计支撑板结构十分必要。

(4) 辐板式聚氨酯轮胎的侧偏刚度和回正刚度与子午线橡胶轮胎相差不大,说明辐板式聚氨

酯轮胎的操控性能并未因轮胎结构的改变而有所减弱。

参考文献：

[1] 姜成,赵又群,阮米庆,等. 非充气安全轮胎技术现状与发展[J]. 机械设计与制造,2013(9):266-272.
[2] 李浩,朱锡,梅志远. 聚氨酯基水声吸声材料的合成工艺及改性[J]. 塑料,2010,39(1):20-24.
[3] 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.
[4] 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[A]. 中国聚氨酯工业协会第十五次年会,上海,2010:420-423.
[5] 赵鹏,杨卫民. 胎体结构对塑料轮胎性能影响的仿真研究及结构优化[J]. 工程塑料应用,2012,40(11):34-38.
[6] 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,2006:94,53-55.
[7] 王伟,徐忠丽,赵树高,等. 载重子午线轮胎接地面有限元分析[J]. 弹性体,2006,16(1):29-32.

收稿日期:2015-02-16

Study on Cornering Rolling Performance of Polyurethane Radial Tire

XUE Zi-chen^{1,2}, HE Jian-yun^{1,2}, YANG Wei-min^{1,2}, JIAO Zhi-wei^{1,2}

(1. National Engineering Laboratory of Tire Design and Manufacturing Process, Beijing 100029, China; 2. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: A model of radial plate polyurethane tire which combined polyurethane wheel disk and rubber tread was established, and the mechanical performance, grounding performance and handling performance of the tire under cornering rolling condition were analyzed by Abaqus finite element software. The results showed that, compared with radial rubber tire, the force distribution of tread and belt cord of the polyurethane radial tire was more uniform, which could effectively prevent the separation of belt. It was found that the upper and lower ends and central part of the support plate were more likely to be damaged due to fatigue, which made the design of support plate structure very critical. In addition, the cornering stiffness and aligning stiffness were almost the same.

Key words: polyurethane radial tire; cornering rolling; grounding pressure distribution; finite element analysis

固特异找到稻壳灰供应商

中图分类号:TQ336.1;U463.341 文献标志码:D

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntire-dealer.com)2015年6月10日报道:

固特异轮胎和橡胶公司与中国益海粮油工业有限公司达成稻壳灰白炭黑供货协议。固特异2015年将在中国普兰店工厂生产的消费轮胎中开始使用这种白炭黑,轮胎将在中国出售。

固特异称其过去两年一直在其创新中心对稻壳灰白炭黑进行测试,发现稻壳灰白炭黑对轮胎性能的影响与传统来源白炭黑相当。

董事长兼首席执行官 Richard J. Kramer 称,“这种新型白炭黑对环境有益,表现在减少垃圾掩埋的浪费、生产过程节能、有助于提高轮胎的燃油

效率多个方面。”

联合国粮农组织称,世界上每年产出7亿多吨水稻,处理这些稻壳是一项环境大挑战。

稻壳通常用于燃烧发电,以减少填埋量。虽然将稻壳灰转换成白炭黑已经有几年了,但是只有最近研究出的加工方法能够使白炭黑的等级高到可以用于轮胎。

白炭黑作为补强剂用于轮胎胎面胶中。与轮胎传统补强剂炭黑相比,白炭黑可以降低滚动阻力,从而改善车辆的燃油经济性。此外,白炭黑还对轮胎的湿路面牵引性能有积极影响。

除与益海签订协议外,固特异还在与其他供应商进行谈判。协议的财务细节未被公布。

(马 晓摘译 许炳才校)