

子午线轮胎接地特性及侧偏特性的有限元分析

蒋丰璘

(双钱集团上海轮胎研究所有限公司, 上海 200245)

摘要:以子午线轮胎11.00R20为例,考虑轮胎变形的几何非线性、材料非线性以及轮胎与地面、轮胎与轮辋的大变形非线性接触等,利用ABAQUS软件建立了轮胎与地面接触的三维有限元模型。研究了充气压力、下沉量、行驶速度、轮胎与地面的摩擦因数和侧偏角等参数对轮胎接地特性的影响。并模拟了轮胎的侧偏运动,研究了垂直负荷、充气压力和轮胎与地面的摩擦因数等参数对轮胎侧偏特性的影响。结果表明,这些参数对轮胎的接地特性和侧偏特性有一定的影响,从而为轮胎设计 and 应用提供参考。

关键词:子午线轮胎;接地特性;侧偏特性;有限元分析

中图分类号:U463.341⁺.3/.6;O241.82 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-8171(2016)07-0392-08

轮胎是汽车的主要配件,其作用主要是支撑车辆的负荷,向地面传递驱动力、制动力和转向力,承担车辆缓冲减震等功能,同时对汽车的乘坐舒适性、操纵性、安全性和经济性等方面都产生重要影响^[1]。车辆支撑、导向和操纵所需的力全作用于轮胎接地区域,因此轮胎与路面的接触问题成为研究的重点。本工作以子午线轮胎11.00R20为例,考虑轮胎变形的几何非线性、材料非线性以及轮胎与地面、轮胎与轮辋的大变形非线性接触等,利用ABAQUS软件建立了轮胎与地面接触的三维有限元模型,研究轮胎的接地特性,并模拟了轮胎的侧偏运动,研究其侧偏特性,以期能为轮胎设计 and 应用提供参考。

1 有限元模型建立

1.1 材料模型

轮胎是由多种材料组成的复合体,包括橡胶、钢丝帘线以及帘线-橡胶复合材料。轮胎中的胎体帘布和带束层均为各向异性的帘线-橡胶复合材料,采用Rebar模型来模拟。橡胶材料用各向同性的不可压缩实体单元表示,采用YEOH应变能密度函数描述其应力-应变关系,本工作中YEOH超弹性模型的参数是通过试验数据拟合得到的。钢丝圈采用各向同性的线弹性材料单元描述。

作者简介:蒋丰璘(1985—),女,广西桂林人,双钱集团上海轮胎研究所有限公司工程师,硕士,主要从事轮胎结构设计和有限元分析工作。

1.2 边界条件

传统计算中通常忽略轮辋,在胎圈处施加相应的边界条件,这样减小了计算收敛的难度,但是难以准确描述胎圈部位的应力分布。本工作使用接触边界条件对轮胎进行从装配到静负荷工况、滚动工况以及侧偏工况的一系列计算。将轮辋和路面简化为解析刚体,轮胎与轮辋、轮胎与地面之间的接触采用有限滑移法^[2]描述。

1.3 轮胎与地面接触的三维有限元模型

首先按照11.00R20子午线轮胎的材料分布图划分网格,生成二维inp文件,橡胶材料采用CGAX4H单元,骨架材料采用SFMGAX1单元。然后使用*SYMMETRIC MODEL GENERATION关键字将轴对称模型旋转360°生成三维模型,在接地部位网格细化为2°,其余部位依次为5°和9°,总共74个断面。三维有限元模型如图1所示,模型共有138 380个单元、148 148个节点。

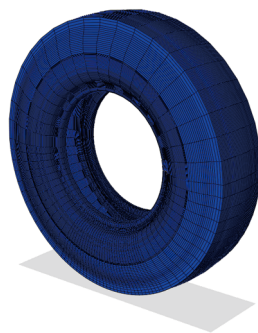


图1 轮胎三维有限元模型

2 结果与讨论

2.1 充气压力

当垂直负荷增大到一定值时,轮胎接地面内的应力分布由中心高、周围低逐渐变为中心部位较低、周围逐渐升高至最大值再向外又逐渐降低,即发生翘曲现象。在不同充气压力下,轮胎接地面应力分布发生翘曲时的相应负荷也不同,如图2所示。由图2可知,轮胎发生翘曲时的相应负荷随着充气压力的提高而增大。

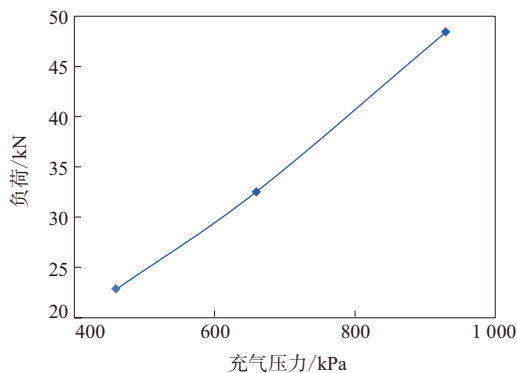


图2 在不同充气压力下轮胎接地面应力分布发生翘曲时的相应负荷

在标准负荷(35.5 kN)下,不同充气压力轮胎的接地面积和最大法向接地应力如表1所示,静态法向接地应力分布如图3所示。

表1 标准负荷下轮胎充气压力与接地面积和最大法向接地应力的关系

项 目	充气压力/kPa				
	460	660	830	930	980
接地面积/mm ²	85 607	75 516	67 435	63 850	62 103
最大法向接地应力/MPa	0.902 6	0.794 7	0.854 8	0.953 6	1.007 0

从表1和图3可以看出:当负荷一定时,充气压力高时接地印痕近似为椭圆形,接地中心区域压力最大,边缘部位压力较小;随着充气压力的降低,下沉量增大,轮胎的接地面积增大,接地印痕由椭圆形逐渐向矩形扩展,接地区域的压力分布变为中心低、边缘高,发生翘曲现象,此时,胎肩部承担压力最大,容易出现胎肩磨损。

下沉量为30 mm时,不同充气压力下轮胎的负荷值如图4所示。从图4可以看出,当下沉量一定时,轮胎在不同充气压力下的负荷能力不同;随着充气压力的提高,轮胎负荷值近似呈线性增大。

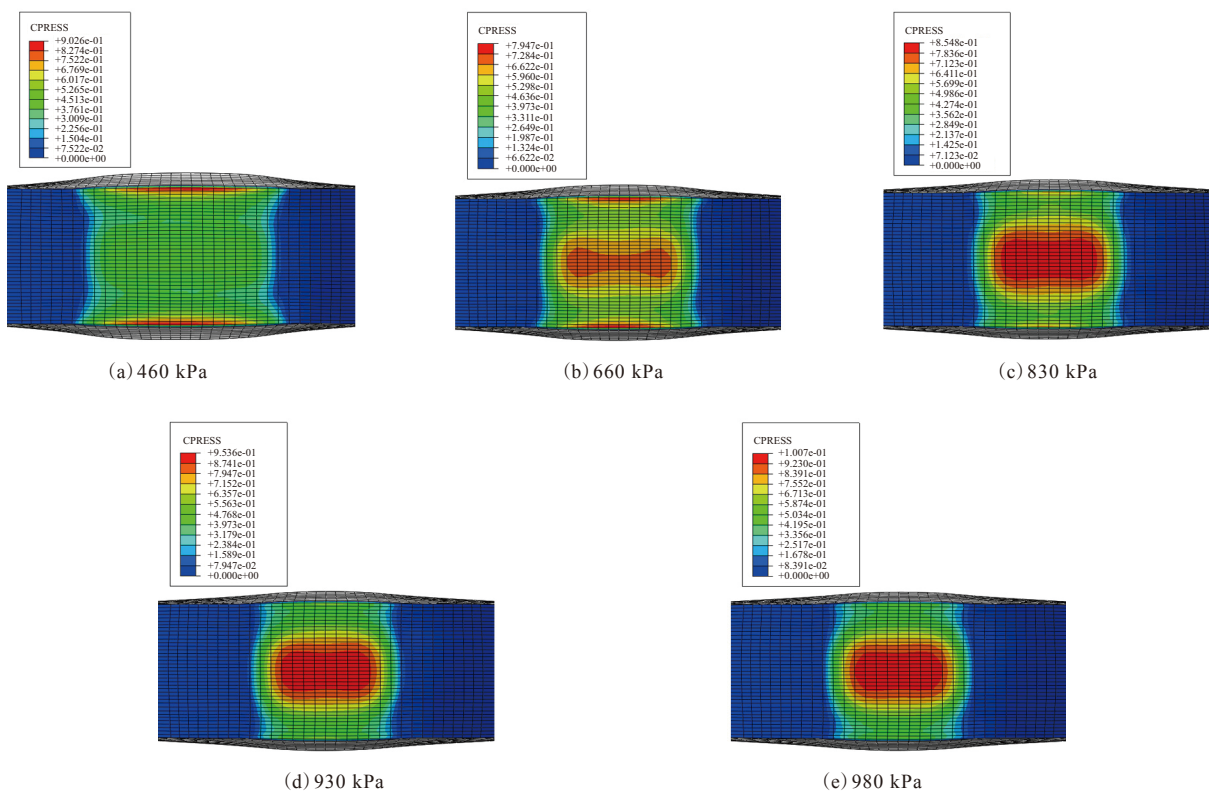


图3 不同充气压力下轮胎静态法向接地应力分布云图

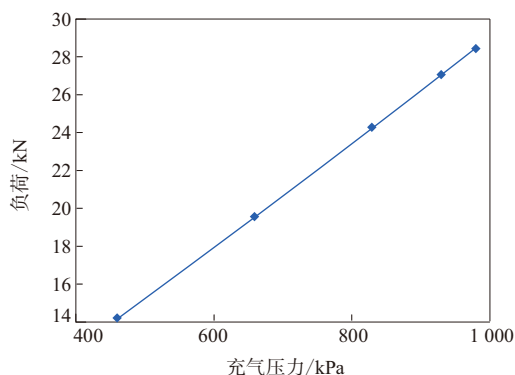


图4 下沉量为30 mm时不同充气压力下的负荷值

不同充气压力下轮胎负荷与下沉量的关系曲线如图5所示。

从图5可以看出:下沉量小于6 mm时,橡胶材料大应变时存在应力-应变增强效应,即硬化现象;下沉量大于6 mm时,负荷与下沉量近似呈线性关系,直线的斜率即为轮胎的径向刚度。轮胎的径向刚度随着充气压力的提高而增大。

2.2 下沉量

在标准充气压力(930 kPa)、不同下沉量下,轮胎的静态接地法向应力分布如图6所示。

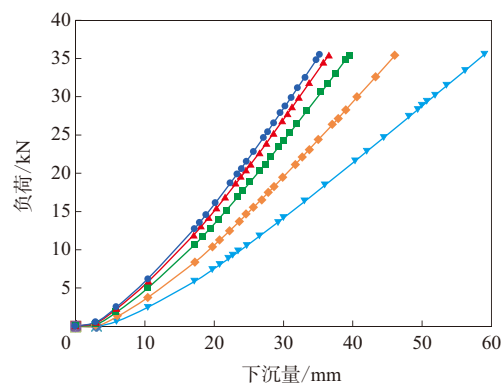


图5 负荷-下沉量关系曲线

从图6可以看出:在下沉量为19 mm时,接地印痕近似为椭圆形,接地中心区域压力最大;下沉量大于30 mm时,随着下沉量的增大,接地面积增大,接地印痕由椭圆形逐渐向矩形扩展,边缘部位开始受到压力;下沉量增大到46 mm时,接地区域的压力分布变为中心低、边缘高,发生翘曲现象。另外,当高应力区在中心处时,随着下沉量的增大,最大接地压力减小,这可能是由于接地面积增幅更大造成的;当高应力区扩展到边缘处时,最大

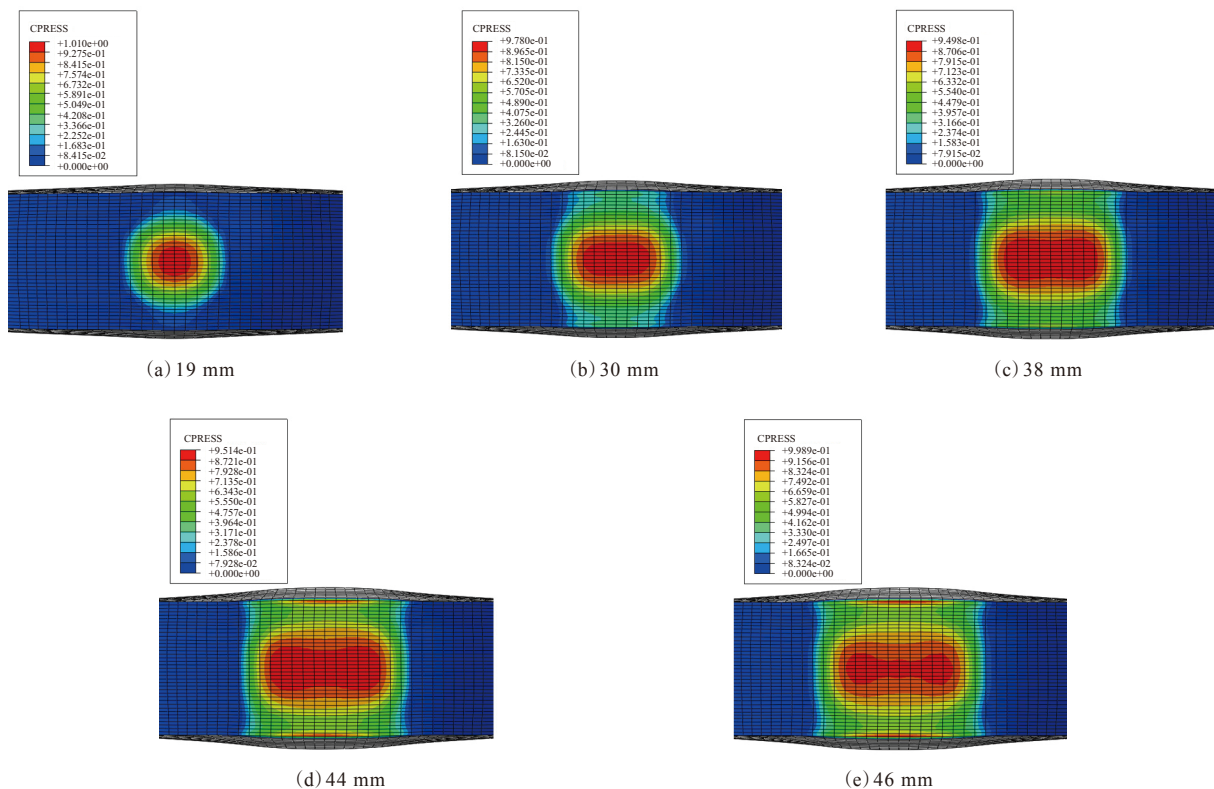


图6 不同下沉量下轮胎静态法向接地应力分布云图

接地压力增大,此时,胎肩部位承担压力最大,容易出现胎肩磨损。

2.3 行驶速度

在标准负荷和标准充气压力下,轮胎自由滚动时不同速度下的接地特性数据如表2所示。

项 目	速度/(km·h ⁻¹)		
	30	60	100
接地印痕横轴长度/mm	243.1	243	242
接地印痕纵轴长度/mm	277.8	286.62	309.48
滚动半径/mm	533.333	533.436	533.562
接地面积/mm ²	67 851	69 043	69 498

从表2可以看出,在相同充气压力和负荷下,轮胎自由滚动时随着速度的提高,接地印痕横轴略微变短,纵轴变长,接地面积增大,与文献[3]描

述相符。另外还可以看出,随着行驶速度的提高,轮胎自由滚动半径增大,这与文献[4]描述相符。

不同工况下轮胎法向接地应力分布如图7所示。从图7可以看出:在制动状态下,接触区域向与运动方向相反的方向扩展,高应力发生在接触区前部;与自由滚动状态相比,在牵引状态下,接触区域向运动方向移动更明显,高应力发生在接触区后部;自由滚动时轮胎接地压力最大值大于静态接地时的最大值。

2.4 摩擦因数

在行驶速度为30 km·h⁻¹条件下,轮胎与地面的摩擦因数为0.2、0.7和0.9时,轮胎的自由滚动角速度和最大纵向摩擦剪应力如表3所示。

从表3可以看出:摩擦因数越大,轮胎的自由

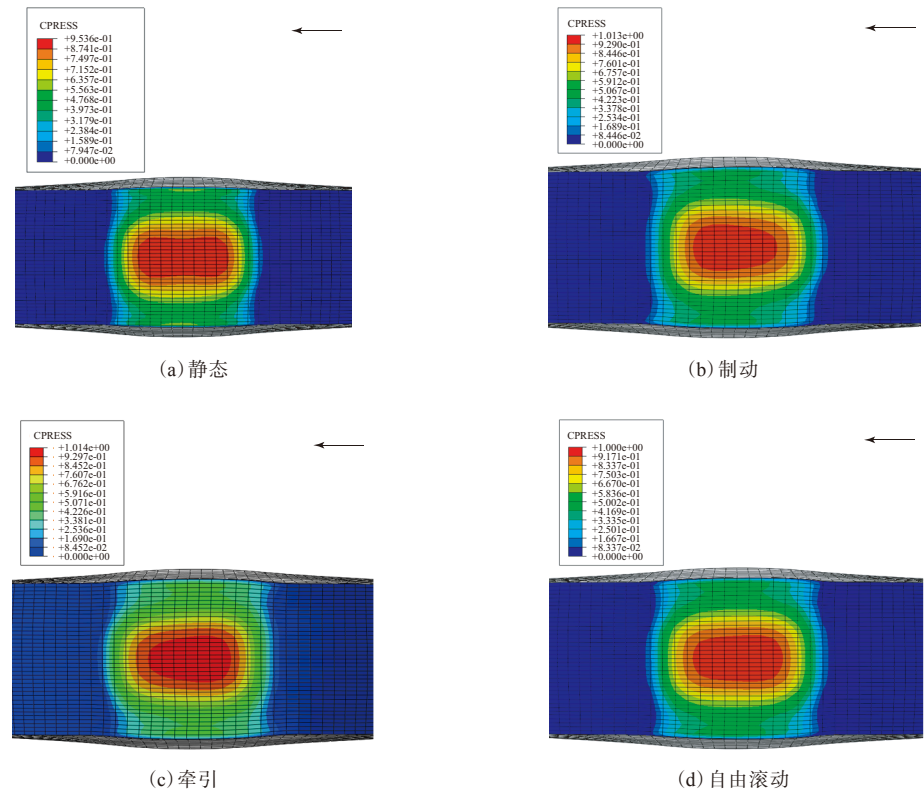


图7 不同工况下轮胎的法向接地应力分布云图(←轮胎滚动方向)

项 目	摩擦因数		
	0.2	0.7	0.9
自由滚动角速度/(rad·s ⁻¹)	15.624 6	15.601 2	15.597 2
最大纵向摩擦剪应力/MPa	0.023 48	0.031 73	0.033 56

滚动角速度越低,从而自由滚动半径越大;摩擦因数越大,纵向摩擦剪应力越大,胎面越容易磨损。

2.5 侧偏角

当轮胎与地面的摩擦因数为0.2和0.7时,不同侧偏角下轮胎法向接地应力分布分别如图8和9所示。

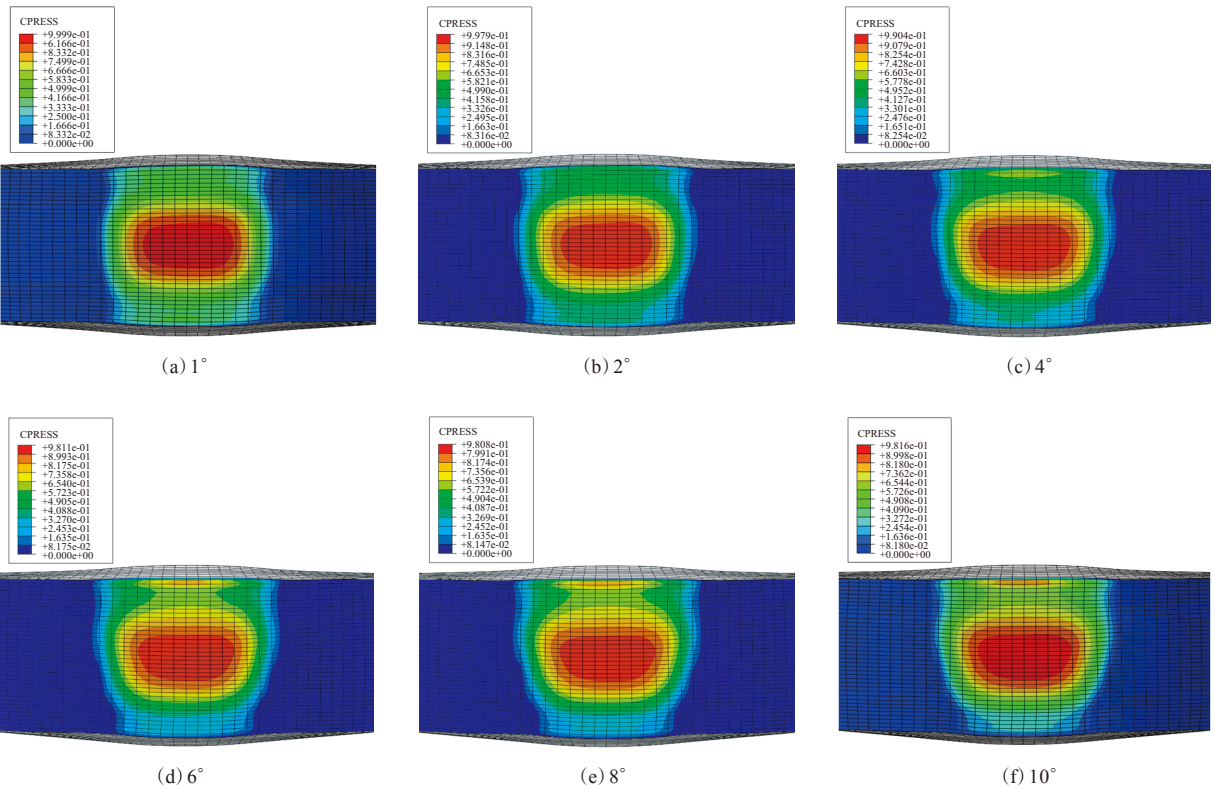


图8 摩擦因数为0.2时不同侧偏角下轮胎的法向接地应力分布云图

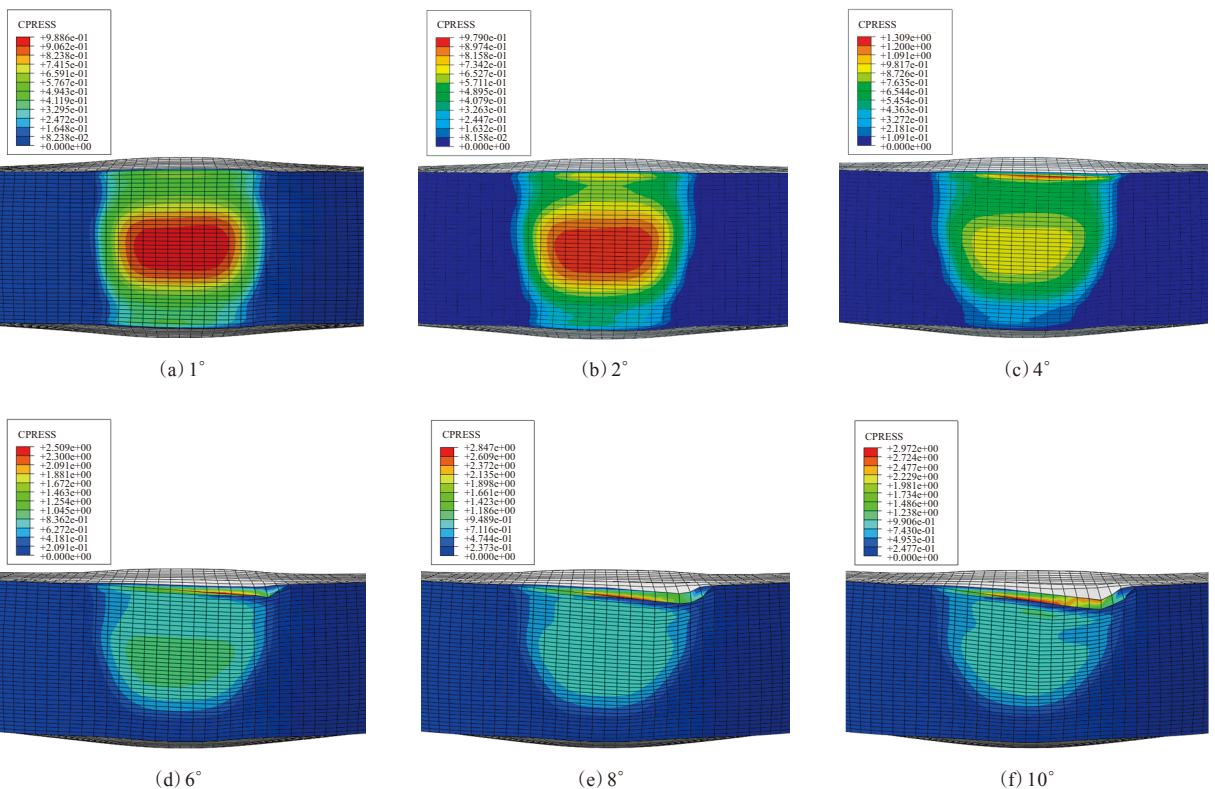


图9 摩擦因数为0.7时不同侧偏角下轮胎的法向接地应力分布云图

从图8和9可以看出:轮胎发生侧偏时,接地印痕向一侧移动,逐渐变为三角形;侧偏角较小时,高压区在接地中心处,且最大接地压力逐渐变小;随着侧偏角的增大,高压区出现在侧偏一边,且最大接地压力逐渐变大,接地面积减小。另外还可以看出,摩擦因数对侧偏时的轮胎接地印痕影响很大。

2.6 侧偏特性

2.6.1 垂直负荷

不同垂直负荷下侧偏力和回正力矩与侧偏角的关系曲线分别如图10和11所示。

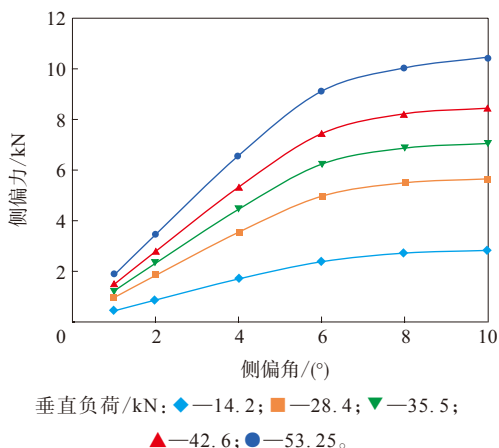


图10 不同垂直负荷下侧偏力与侧偏角的关系曲线

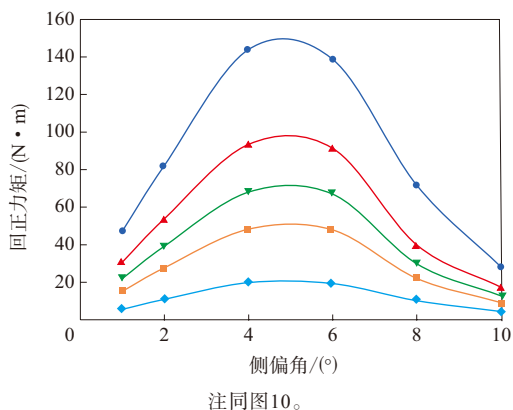


图11 不同垂直负荷下回正力矩与侧偏角的关系曲线

从图10可以看出,随着垂直负荷的增大,轮胎的侧偏力也相应地增大,侧偏刚度也越大。另外还可以看出,当轮胎侧偏角较小时($<5^\circ$),侧偏力与侧偏角近似呈线性关系,但是随着侧偏角的进一步增大,侧偏力增大的趋势逐渐平缓,这是因为当侧偏力增大到一定程度(达到附着极限)时,轮

胎会发生侧向滑移,故侧偏力几乎不再增大。侧偏刚度取决于垂直负荷。

从图11可以看出,随着垂直负荷的增大,轮胎的回正力矩也相应地增大,回正刚度也越大。回正力矩的幅值在一定侧偏角下达到峰值,随后开始下降。回正力矩取决于垂直负荷。

2.6.2 充气压力

不同充气压力下侧偏力和回正力矩与侧偏角的关系曲线分别如图12和13所示。

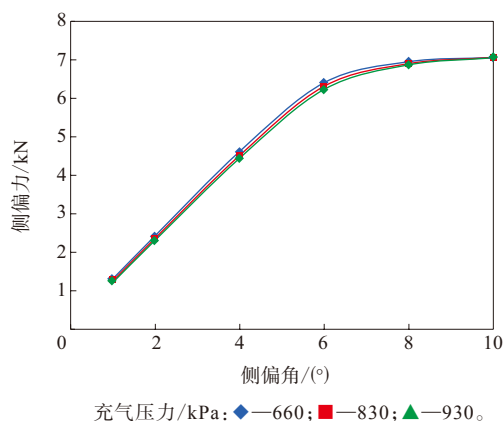


图12 不同充气压力下侧偏力与侧偏角的关系曲线

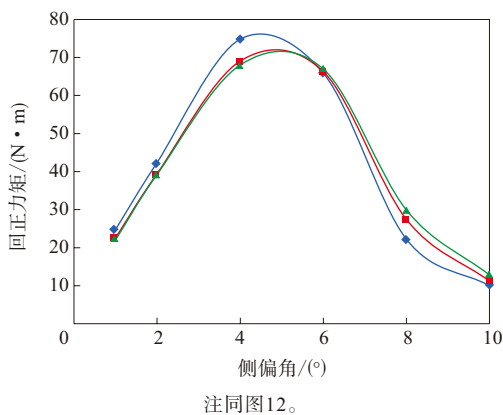


图13 不同充气压力下回正力矩与侧偏角的关系曲线

从图12可以看出,随着充气压力的增大,轮胎的侧偏力相应地减小,侧偏刚度也越小。

从图13可以看出,随着充气压力的增大,轮胎回正力矩的峰值减小。相对于垂直负荷来说,充气压力对侧偏刚度和回正力矩的影响较小。

2.6.3 摩擦因数

不同摩擦因数下侧偏力和回正力矩与侧偏角的关系曲线分别如图14和15所示。

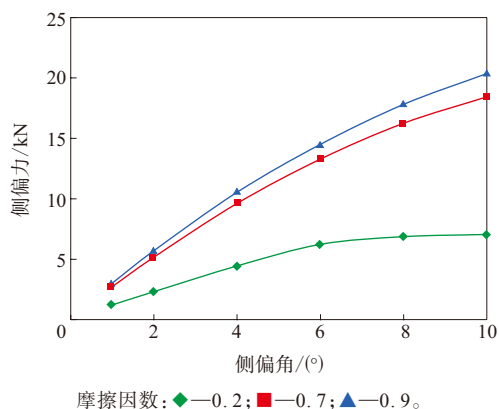


图14 不同摩擦因数下侧偏力与侧偏角的关系曲线

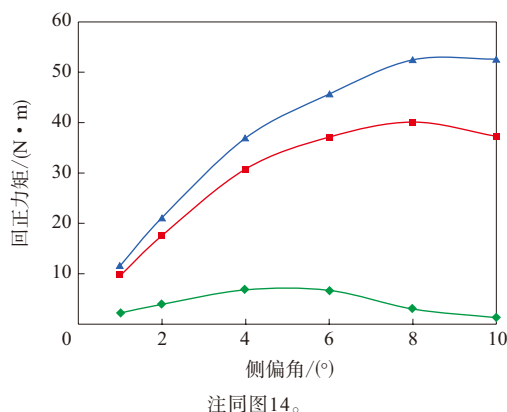


图15 不同摩擦因数下回正力矩与侧偏角的关系曲线

从图14可以看出,随着摩擦因数的增大,轮胎的侧偏力也相应地增大,侧偏刚度也越大。

从图15可以看出,随着摩擦因数的增大,轮胎的回正力矩也相应地增大,回正刚度也越大。轮胎与地面的摩擦因数对侧偏刚度和回正力矩的影响很大。

3 结论

通过对11.00R20子午线轮胎接地特性和侧偏特性的研究,主要可以得出以下结论。

(1) 充气压力越高,轮胎接地面应力分布发生翘曲时的负荷值越大;当负荷一定时,下沉量随着充气压力的提高而增大;当下沉量一定时,轮胎所承受的负荷值随着充气压力的提高而近似呈线性增大。

(2) 随着下沉量的增大,接地印痕由椭圆形逐渐向矩形扩展,高应力区由接地中心处移动到边缘处。当高应力区在中心处时,接地面积增大,最

大接地压力减小;当高应力区扩展到边缘处时,最大接地压力增大,此时,胎肩部位承担压力最大,容易出现胎肩磨损。

(3) 自由滚动时随着行驶速度的提高,接地印痕横轴略微变短,纵轴变长,接地面积增大,滚动半径随着速度提高而增大。

(4) 在制动状态下,接触区域向与运动方向相反的方向扩展,高应力发生在接触区前部;与自由滚动状态相比,在牵引状态下,接触区域向运动方向移动更明显,高应力发生在接触区后部。

(5) 摩擦因数越大,轮胎的自由滚动角速度越低,从而自由滚动半径越大;摩擦因数越大,纵向摩擦剪应力越大,胎面越容易磨损。

(6) 轮胎发生侧偏时,接地印痕向一侧移动,逐渐变为三角形;侧偏角较小时,高压区在接地中心处,且最大接地压力逐渐变小;随着侧偏角的增大,高压区出现在侧偏一边,且最大接地压力逐渐变大,接地面积减小。摩擦因数对侧偏时轮胎的接地印痕影响很大。

(7) 侧偏刚度和回正力矩取决于垂直负荷;随着垂直负荷的增大,轮胎的侧偏力和回正力矩也相应地增大;当侧偏角增大到一定值,侧偏力增大的趋势逐渐平缓;回正力矩的幅值在一定的侧偏角下达到峰值后开始下降。

(8) 充气压力对侧偏刚度和回正力矩的影响较小;随着充气压力的增大,轮胎的侧偏力和回正力矩的峰值也相应地减小。

(9) 摩擦因数对侧偏刚度和回正力矩的影响很大;随着摩擦因数的增大,轮胎的侧偏力和回正力矩也相应地增大。

参考文献:

- [1] 庄继德. 现代轮胎技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2001:18-130.
- [2] 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,2006:137-138.
- [3] 俞洪,丁剑平,张安强,等. 子午线轮胎结构与制造技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006:213-217.
- [4] 韩加蓬,周孔亢,孙春玲. 影响轮胎滚动半径的因素研究[J]. 农机化研究,2007(1):163-166.

收稿日期:2016-01-21

Finite Element Analysis on Ground Contact Characteristics and Cornering Properties of Radial Tire

JIANG Fenglin

(Double Coin Group Shanghai Tyre Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200245, China)

Abstract: Taking radial tire 11.00R20 as an example, a three-dimensional finite element model of tire-ground contact was established by using ABAQUS software, considering the geometric nonlinearity, material nonlinearity and large deformation in nonlinear contact between tire and ground and between tire and rim. The effects of parameters such as inflation pressure, deformation, driving speed, friction coefficient between tire and ground and slip angle on tire-ground contact characteristics were studied. The cornering movement of the tire was simulated, and the effects of parameters such as vertical load, inflation pressure and friction coefficient between tire and ground on cornering properties were investigated. The results showed that these parameters had impact on the contact characteristics and cornering properties of tire and provided a useful reference for design and application of tire.

Key words: radial tire; contact characteristics; cornering property; finite element analysis

特拓发布轮胎云设计平台等新技术产品

中图分类号:F276.7;TQ330.8 文献标志码:D

2016年5月15日上午,特拓(青岛)轮胎技术有限公司(简称TTA)在广饶会展中心广饶国际橡胶轮胎暨汽车配件展上召开2016年新技术产品发布会,发布了轮胎云设计平台等新技术产品。

山东省行业橡胶协会会长张洪民先生,中国橡胶工业协会材料分会秘书长侯凤霞女士,青岛科技大学机电学院教授曾宪奎先生,山东丰源轮胎制造股份有限公司总经理王中江先生、总工程师罗吉良先生以及轮胎业内专家等200余位出席了发布会。

发布会上,TTA轮胎研究部经理张晓鹏介绍说:TTA轮胎云设计平台是德国、加拿大和中国技术人员共同研发的成果,采用了虚拟计算技术,轮胎设计人员可通过网络远程调用平台软件进行轮胎新产品开发。

轮胎云设计平台提供了多款软件,主要包括轮胎外轮廓自动设计、轮胎花纹参数化设计、轮胎花纹节距排列、轮胎花纹性能分析和高清效果图渲染等功能,可以实现轮胎设计的一站式服务。

发布会还介绍了新型橡胶混炼技术与新型过程控制技术,公司副总工程师朱家顺博士称,新型

橡胶混炼技术可依据客户需求优化设备选型工艺布局,日均产能可达到40~200 t。新型橡胶混炼技术主要包括一步法炼胶技术(SSM)、硫化助剂母胶制备技术(SAP)、自动生产准备技术(ARP)和绿色轮胎生产技术(FSC)。SSM能同时提高炼胶的质量和产量,大幅度提高胶料的稳定性和均匀性;SAP的工艺精确可靠、设备简单、投资小且易维护,主要为SSM系统配套;ARP则可降低生胶的波动,提高胶料及半成品的质量稳定性,与SSM联合使用可进一步提高胶料质量和生产效率;FSC则包含混炼工艺标准及质量控制方法,应用于SSM时,可产生协同效应,使SSM达到最大质量和产能。发布会介绍的新型过程控制技术可提高橡胶检测的效率与准确性。

TTA还展示了能准确检测胶料粘性的胶料表面粘性分析仪(TMA)、可快速准确地检验胶料流动性的胶料流动性分析仪(VMA)及能完成硫化测温及硫化过程分析的硫化分析仪(CMA)、导电胶条连续性检测仪(SCA)。

新技术的发布展现了TTA的创新能力和透过新技术发布会,可以看到国内轮胎设计和生产技术的巨大进步。

(本刊编辑部 田军涛)