

载重子午线轮胎接地特性的有限元分析

冯琳阁,李文博,辛振祥

(青岛科技大学 轮胎 RCAD 研究室,山东 青岛 266042)

摘要:采用 Abaqus 有限元分析软件建立 11.00R20 载重子午线轮胎与地面接触的三维有限元模型,研究轮胎的接地特性。结果表明:充气压力越高,轮胎接地区域应力出现中心低、边缘高翘曲现象的负荷值越大;下沉量增大,轮胎接地印痕从椭圆变为矩形,高压区由胎冠处移动到胎肩处;在各种工况中,轮胎静态接地面积最大;自由滚动时随着速度提高,轮胎接地印痕纵轴变长、横轴变短,但是接地面积增大,总接地反力也增大;摩擦因数对轮胎的自由滚动半径影响较小,但摩擦因数越大,纵向剪切应力越大,胎面越容易磨损;随着侧偏角增大,接地高压区逐渐向一边移动,接地印痕变为三角形。

关键词:载重子午线轮胎;自由滚动;接地压力;有限元分析

中图分类号:TQ336.1;O241.82 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-8171(2013)09-0525-08

轮胎是汽车的重要组成部分,它直接与路面接触,并传递汽车的牵引力、转向力和制动力,提供缓冲隔震作用和路面抓着力。近年来,对轮胎的安全性、耐久性、经济性、舒适性、行驶性能的要求更高^[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。

由于具有几何非线性和材料非线性的轮胎受力变形复杂,因此轮胎研究工作难度很大,主要集中在试验研究上,试验成本高,周期长。随着复合材料科学、数值计算方法、有限元理论和计算机科学的发展,有限元分析成为研究轮胎与地面接触问题的重要手段。H. Rothert 等^[2]用三维有限元法分析了轮胎静态下与地面的接触问题。程刚^[3]采用试验研究和数值模拟相结合的方法,对子午线轮胎 195/60R14 静态接地性能和滚动性能等进行了有限元分析。本研究采用 Abaqus 有限元分析软件建立 11.00R20 子午线轮胎的三维非线性模型,模拟研究轮胎的相关接地特性。

1 有限元模型建立

1.1 材料模型

本研究子午线轮胎由胎面、胎肩、胎侧和胎圈

等部分组成,在其断面结构的不同部位采用不同的材料。轮胎是由橡胶和帘线等多种复合材料构成的。胎面、胎侧、胎肩和胎圈三角胶等部位采用各向同性的橡胶材料。胎体、带束层、胎圈包布、锦纶增强层和钢丝圈采用各向异性的橡胶-帘线复合材料。胎体帘布、带束层和钢丝圈采用 rebar 嵌入式单元处理,钢丝帘线为各向同性的线弹性材料,帘线角度在负荷作用下随胎体曲率变化而变化;各类橡胶材料用各向同性的不可压缩单元表示,选用 Mooney-Rivlin 超弹性模型,通过试验所得数据拟合模型参数。

1.2 接触模型

在 Abaqus 软件中提供了库仑摩擦模型、罚函数摩擦模型、Lagrange 摩擦模型以及动力学摩擦模型^[4]。当轮胎与地面发生接触时,在接触面之间传递法向力和切向力。切向作用包括接触面间的相对滑动和可能存在的摩擦剪切力。

本研究分别采用罚函数和库仑摩擦模型预测法向力(f_n)和切向力(f_s):

$$f_n = \begin{cases} K_n g & g \leq 0 \\ 0 & g > 0 \end{cases}$$

$$f_s = \begin{cases} K_t \eta^e < \bar{F} f_s \\ \bar{F} f_s \end{cases}$$

式中, K_n 为法向接触刚度, g 为根据接触节点相对于目标平面的位置确定的间隙值, K_t 为切向刚

度; η° 为接触节点相对于目标平面的弹性变形; F 为静、动摩擦因数之比; $\overline{f}_s$ 为库仑摩擦模型的极限滑动力。

$$\overline{f}_s = -\mu f_n$$

式中, μ 为滑动摩擦因数。

1.3 轮胎与地面接触的三维有限元模型

首先在 Abaqus 软件中调入在 CAD 中生成的 11.00R20 轮胎的材料分布图,生成子午面二维网格。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°,其余部位为 5°。三维有限元模型如图 1 所示,模型共有 164 475 个单元、175 227 个节点。橡胶材料采用 C3D8RH, C3D6H, C3D8R 和 C3D6 单元,骨架材料采用 SFM3D4R 单元。



图 1 轮胎三维模型

1.4 加载条件

首先施加充气压力。然后固定轮辋,将模型中的路面移动到轮胎充气后的胎面位置,再将路面沿径向移动一定位移,位移的大小等于下沉量。最后在参考点施加一定作用力,即规定负荷。

2 计算结果与讨论

2.1 充气压力

负荷增大到一定值时,轮胎接地面内的应力分布趋势由中间高、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。在不同充气压力下,相应产生这种变化的负荷也不同。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如图 2 所示。

在一定下沉量下,充气压力变化,轮胎承受负

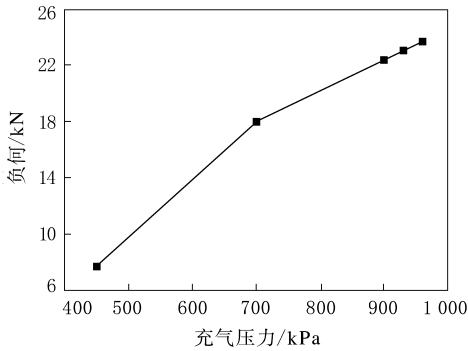


图 2 在不同充气压力下轮胎接地面应力分布发生翘曲时的相应负荷

荷的能力也不同。下沉量为 31 mm 时,轮胎在充气压力为 450,700,900,930 和 960 kPa 下的负荷分别为 17 718.6,25 594.9,31 782.5,32 704.2 和 33 624.7 N。由此可以看出,随着充气压力提高,轮胎承受的负荷近似呈线性增大。

在负荷一定(35 500 N)的情况下,不同充气压力下轮胎接地面积和最大接触应力计算值如表 1 所示,接地法向应力分布如图 3 所示。

表 1 相同负荷下轮胎充气压力与接地面积和最大接触应力的关系

项 目	充气压力/kPa				
	450	700	900	930	960
接地面积/m²	0.068 1	0.052 6	0.050 3	0.050 5	0.051 1
最大接触应力/MPa	1.124	0.851	1.040	1.071	1.105

从表 1 和图 3 可以看出:在相同负荷下,充气压力高时接地印痕近似为椭圆,接地区域中心压力最大,边缘部位压力减小;充气压力越低,下沉量越大,轮胎的接地面积增大,接地印痕逐渐接近矩形,接地区域的压力分布变为中间低、边缘高,即发生翘曲现象,胎肩处承担压力最大。

不同充气压力下轮胎负荷与下沉量的关系曲线如图 4 所示。下沉量小于 5 mm 时,轮胎在加载过程中存在硬化现象。下沉量大于 5 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。充气压力提高,直线的斜率增大,即轮胎的径向刚度增大,证明轮胎的径向刚度主要是由充气压力决定的。

不同充气压力下轮胎纵向和横向接地中心线上的接地压力分布曲线如图 5 所示。

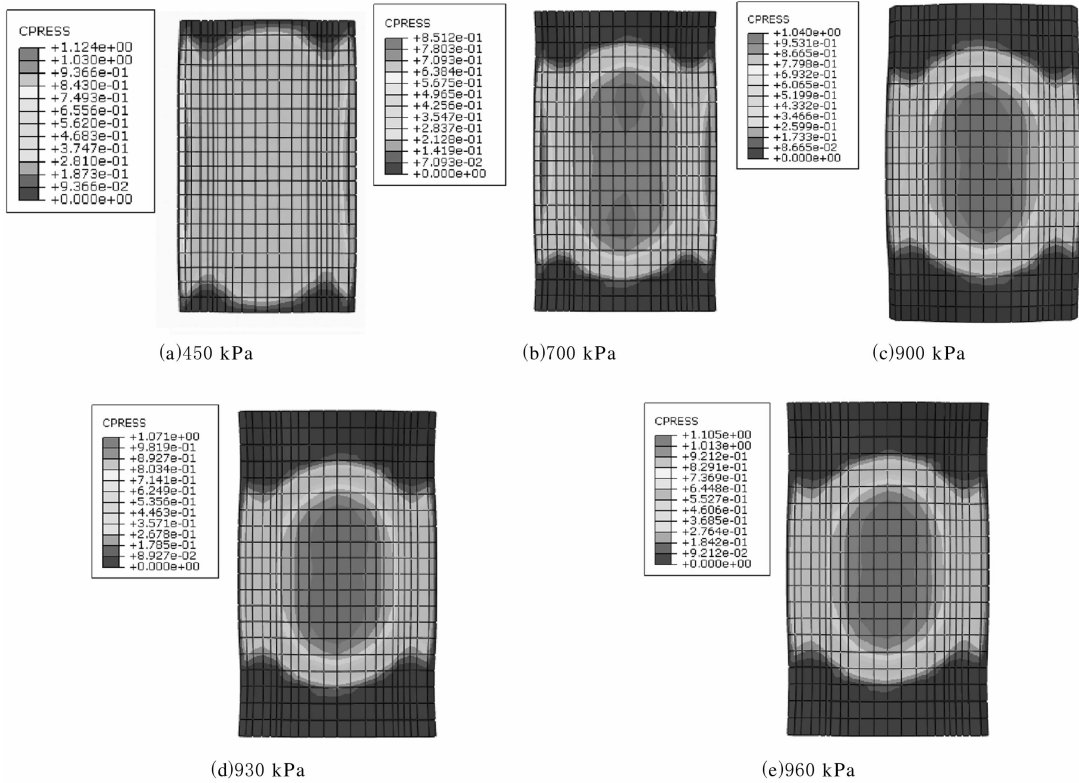
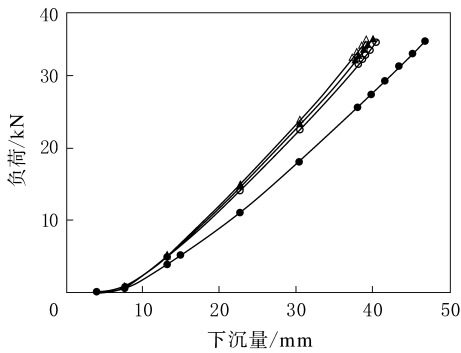


图 3 不同充气压力下轮胎静态接地法向应力分布

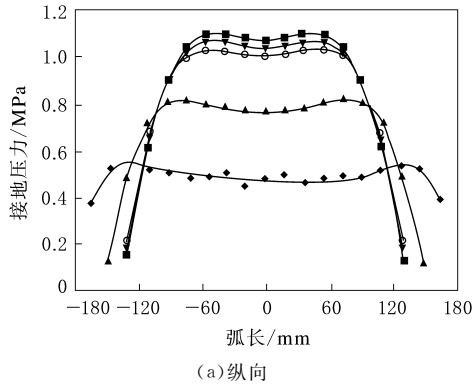


充气压力/kPa: ●—700; ○—900; ▲—930; △—960。

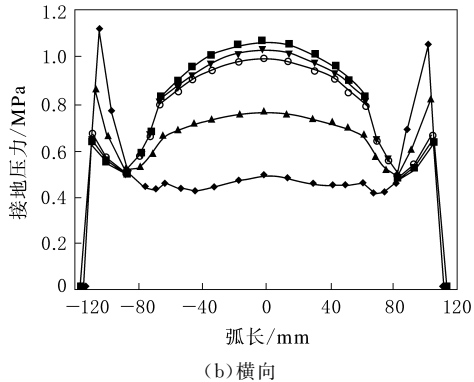
图 4 负荷-下沉量关系曲线

从图 5(a)可以看出:在充气压力较高的情况下,纵向上接地压力先从中心处逐渐增大,然后再逐渐减小,分布呈现马鞍形^[5-6];随着充气压力降低,相同节点的接地压力变小,充气压力降低到 450 kPa 时应力分布比较平坦,基本呈直线分布,只是在边缘处最小。

从图 5(b)可以看出:在充气压力较高的情况下,沿横向接地压力分布是胎面中部较大,胎肩部位减小,但在胎肩边缘反弹,接地压力最大值在接地中心点处;随着充气压力降低,胎面中心至胎肩



(a) 纵向



(b) 横向

充气压力/kPa: ◆—450; ▲—700; ○—900; ▼—930; ■—960。

图 5 不同充气压力下轮胎接地中心线上接地压力分布

处的应力减小,但在胎肩处反而变大,并且应力最大值逐渐转向胎肩处。这说明充气压力较低,轮胎径向刚度变小,接地胎面极易发生变形,接地印痕变为矩形,胎肩处承担压力最大。

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。

从图6可以看出:在下沉量为15 mm时,接

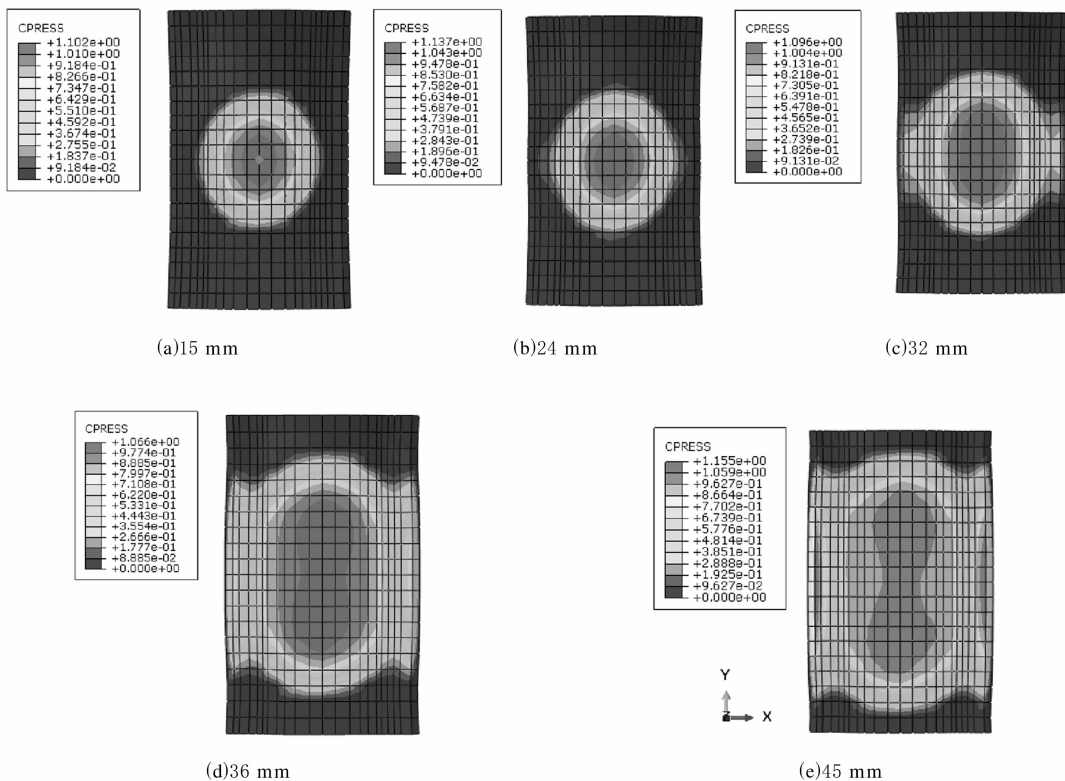


图6 不同下沉量下轮胎静态接地法向应力分布

地区域近似为椭圆形且最大接触应力发生在胎面中心处;下沉量大于24 mm时,随着下沉量的增大,接地面积增大,并且接地形状由椭圆形向矩形扩展,胎肩部位开始受到压力;下沉量增大到45 mm时,接地印痕长度增大,宽度基本不变,接地压力逐渐变为中心低、边缘高,发生翘曲现象。另外,高应力区在中心区域时,随着下沉量的增大,最大接触压力减小,这可能是由于接地面积增幅更大造成的;下沉量继续增大,高应力区扩展到胎肩处时,最大接触压力反而最大,此时容易出现胎肩磨损,实际使用中应该注意超载情况。

不同下沉量下轮胎纵向和横向接地中心线上接地压力分布如图7所示。

从图7可以看出:下沉量增大,接地印痕的纵轴和横轴增大,但在下沉量增大到胎肩部位压力较大时,短轴变化较小,接地面积增大;在纵轴上,

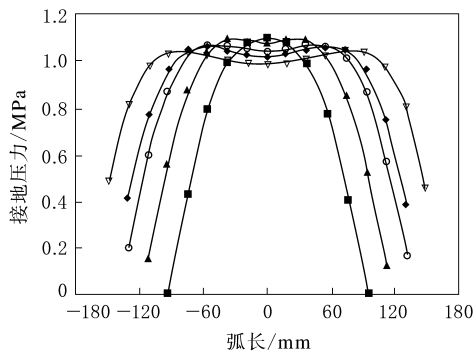
下沉量较小时,接地区域的压力中间高、边缘低,随着下沉量增大,接地区域的压力变为中间低、边缘高,即发生翘曲现象。下沉量增大,接地压力在胎面中部变小,在胎肩边缘部位变大;在横轴上,随着下沉量增大,接触压力最大值逐渐向胎肩部位转移,压力在胎冠部位的分布变得比较平坦。下沉量大于40 mm时,胎肩部位出现最大值。

路面接触反力与下沉量的关系如图8所示。

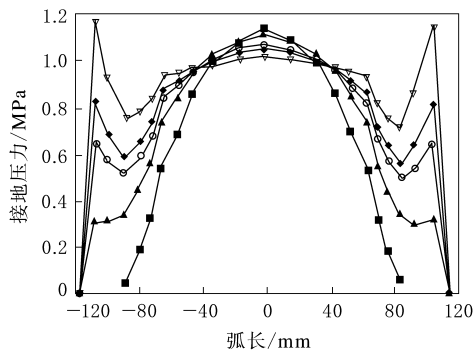
从图8可以看出,随着下沉量增大,路面接触反力增大。

2.3 速度

俞洪等^[7]采用试验的方法研究了行驶速度对接地性能的影响,在转鼓试验机上进行印痕数据的测量。结果表明,在相同充气压力和负荷下,随着行驶速度提高,轮胎接地印痕纵轴变长,横轴略微变短,但是接地面积略有增大。本工作通过有



(a)纵向



(b)横向

下沉量/mm: ■—15; ▲—24; ○—32; ◆—36; ▽—45。

图 7 不同下沉量下轮胎接地中心线上接地压力分布

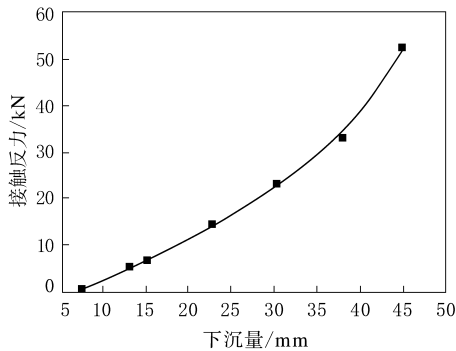


图 8 路面接触反力与下沉量的关系曲线

限元手段研究滚动速度对轮胎接地特性的影响。不同自由滚动速度下轮胎的接地数据如表 2 所示。

表 2 不同自由滚动速度下轮胎的接地数据

项 目	速度/(km · h ⁻¹)			
	0	50	80	100
接地印痕纵轴/mm	261.878	259.576	259.578	259.581
接地印痕横轴/mm	229.908	227.907	227.903	227.901
滚动半径/mm	512.031	511.763	511.764	511.798
总接地反力/N	35 500	35 796	35 993	36 101

从表 2 可以看出,轮胎接地面积在静态接地时最大,自由滚动时随着速度提高,纵轴变长,横轴变短,但是接地面积变大。滚动半径随着速度提高而增大,因为滚动速度越高,产生的离心力越大,把轮胎向外甩出,这与文献[8]描述的相符。轮胎总接地反力随着滚动速度提高而增大,这是因为离心力与角速度的平方成正比,轮胎径向刚度也随之增大。

不同滚动速度及驱动、制动工况下轮胎接地法向应力分布如图 9 所示。

从图 9 可以看出:自由滚动时轮胎接地压力最大值在接触区域的分布向后移,且大于静态接地时的最大值;驱动工况时高应力发生在接触区后部,制动时则在接触区前部。

不同工况下轮胎接地中心线上的接地压力分布如图 10 所示。

从图 10 可以看出,4 种工况下轮胎横向上应力分布特征相似,关于中心线对称。自由滚动时,胎冠处的接地压力大于静态接地工况,这可能是由于静态接地面积最大而导致最大接地压力变小。自由滚动时轮胎纵向上应力分布与静态接地时相似,同样,自由滚动时最大接地压力较大。驱动和制动时,应力在纵向上的分布相差较大,最大接地压力发生偏移。驱动工况时,最大接地压力位于前进方向的反方向;制动工况时,最大接地压力位于前进方向。

在不同滚动速度下,轮胎在纵向和横向上接地压力分布相似,只是随着速度提高,高压区的接地压力增大。

2.4 摩擦因数

在行驶速度 80 km · h⁻¹ 下,摩擦因数为 1.0,0.8,0.6 和 0.3 时轮胎的自由滚动角速度分别为 42.086 3,42.084 4,42.081 8 和 42.080 6 rad · s⁻¹。由此可以看出,摩擦因数越大,轮胎的自由滚动角速度越高,而自由滚动半径则随之减小,但总体上变化不大,说明摩擦因数对轮胎的自由滚动半径影响不大。

不同摩擦因数下轮胎纵向剪切应力分布如图 11 所示。

从图 11 可以看出:在静态接地时,轮胎剪切应力分布左右对称,最大剪切应力位于接地印痕

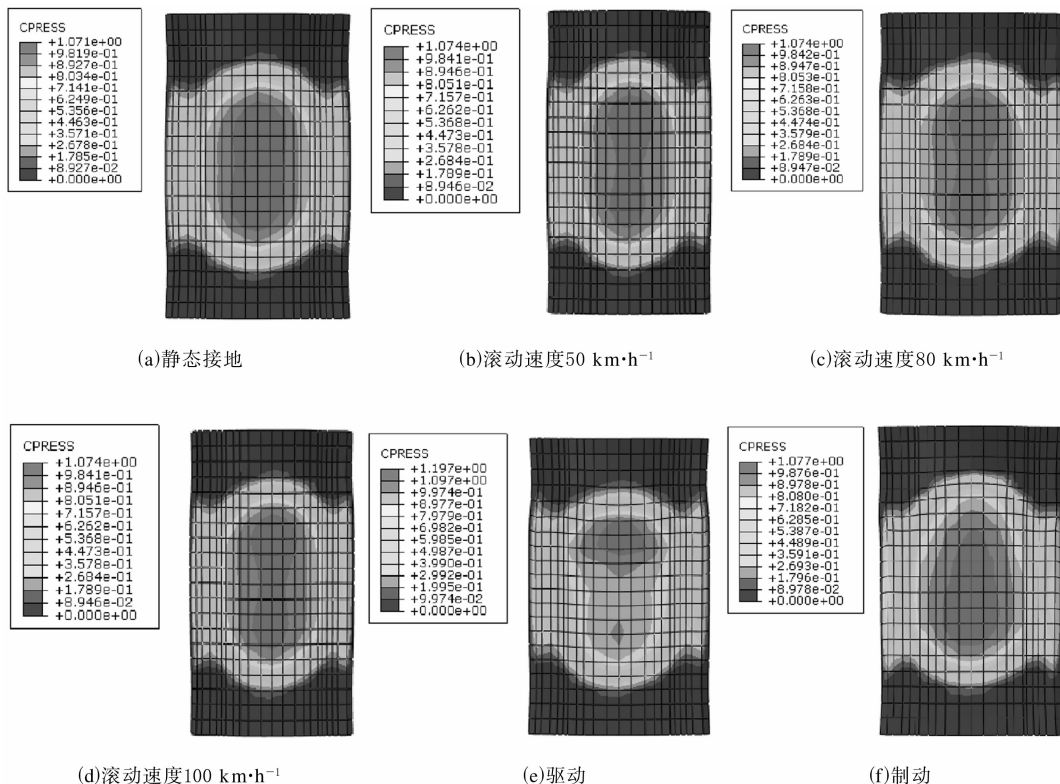
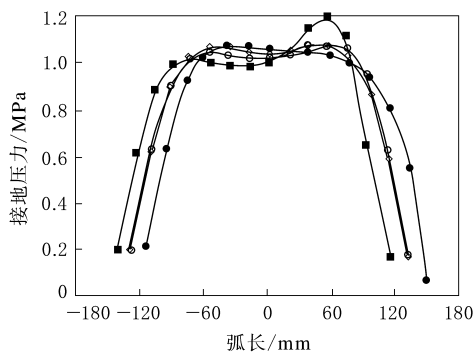
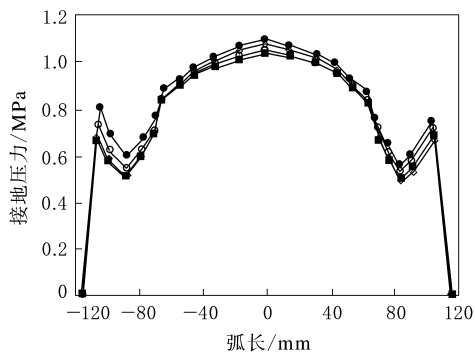


图9 不同滚动速度及驱动、制动工况下轮胎接地法向应力分布(↓行驶方向)



(a)纵向



(b)横向

工况:○—静态接地;◇—自由滚动;■—驱动;●—制动。

图10 不同工况下轮胎接地中心线上的接地压力分布

的横轴两侧;自由滚动时,轮胎最大剪切应力比静态接地时小,摩擦因数越大,剪切应力越大,剪切应力大的胎面部位容易磨损。这与摩擦因数大时胎面容易磨损的实际情况相符。

2.5 侧偏角

不同侧偏角下轮胎接地法向应力分布如图12所示。

从图12可以看出:轮胎在侧偏向一边时,接地印痕向一侧移动,逐渐变为三角形;侧偏角小时,有两个高压区,分别在接地中心处和侧偏的一边,且最大接地压力变小;随着侧偏角增大,接地高压区出现在一边,接地面积减小,最大接地压力逐渐变大。

3 结论

通过对11.00R20全钢载重子午线轮胎接地特性的研究,主要可以得出以下结论。

(1)充气压力越高,轮胎接地区域应力出现中心低、边缘高翘曲现象的负荷值越大;在下沉量一定的情况下,充气压力提高,轮胎承受负荷的能力增大;在负荷一定的情况下,充气压力降低,轮胎

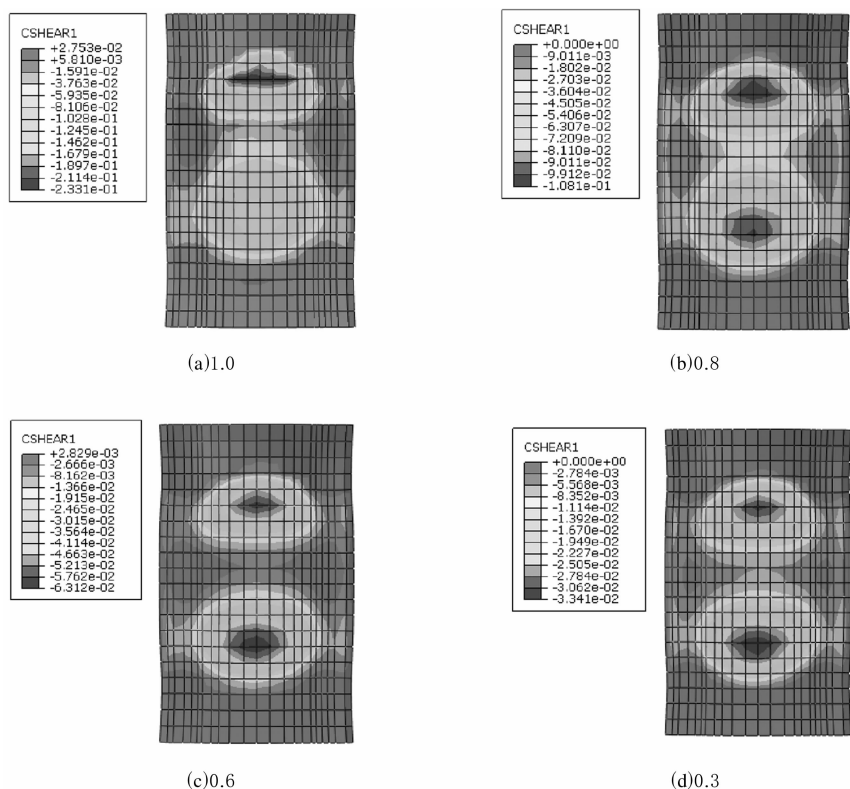


图 11 不同摩擦因数下轮胎纵向剪切应力分布

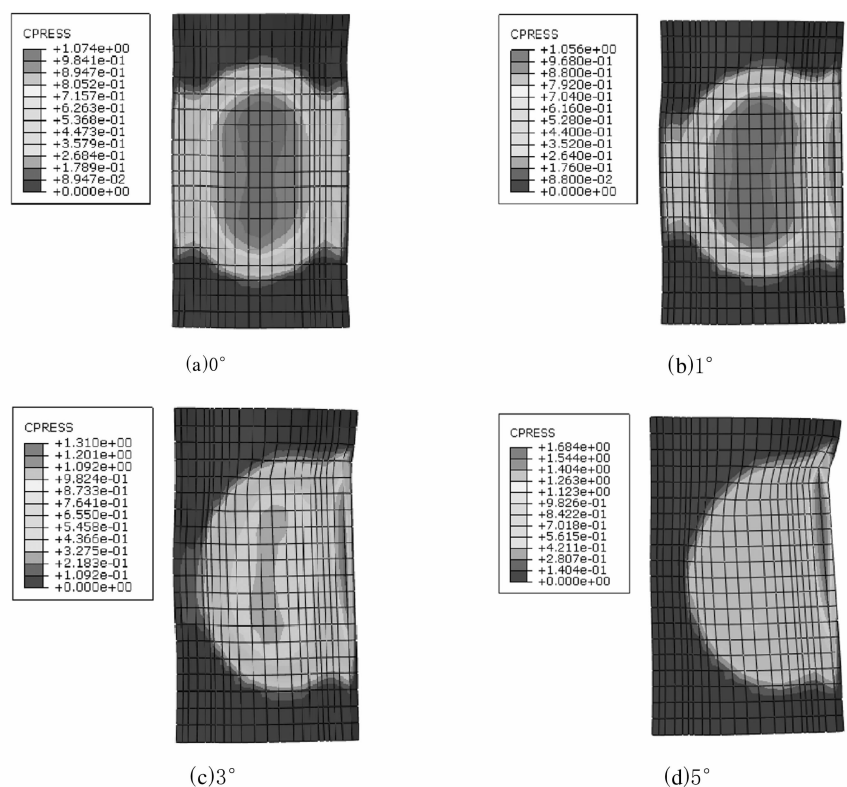


图 12 不同侧偏角下轮胎接地法向应力分布

接地印痕由椭圆变为矩形,高压区逐渐由胎冠向胎肩处移动,最后胎肩处为最大接地压力区。

(2)下沉量增大,轮胎接地印痕从椭圆变为矩形,高压区在胎冠处时,接地面积增大,最大接地压力变小;高压区移动到胎肩处时,最大接地压力变大。

(3)在各种工况中,轮胎静态接地面积最大;自由滚动时随着速度提高,轮胎接地印痕纵轴变长、横轴变短,但是接地面积增大,总接地反力和轮胎径向刚度也增大;轮胎自由滚动的最大接地压力大于静态接地工况;驱动工况时,高压区后移,制动时前移。

(4)摩擦因数对轮胎自由滚动半径的影响较小;摩擦因数越大,纵向剪切应力越大,胎面越容易磨损。

(5)发生侧偏时,随着侧偏角增大,高压区逐渐向一边移动,接地印痕变为三角形。

参考文献:

- [1] 庄继德. 汽车轮胎学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996:1-22.
- [2] Rothert H, Idelberger H, Jacobi W. On the Finite Element Solution of the Three-dimensional Tire Contact Problem[J]. Nuclear Engineering and Design, 1984, 78(3):363-375.
- [3] 程刚. 子午线轮胎力学行为仿真及试验方法研究[D]. 济南:山东大学,2005.
- [4] 路永健,杨绍普,李韶华. 载重子午轮胎与路面相互作用的分析[J]. 公路交通科技, 2009, 26(12):12-16.
- [5] Rothert H, Idelberger H, Jacobi W, et al. On the Contact Problem of Tires Including Friction[J]. Tire Science and Technology, 1985, 13(2):111-123.
- [6] 俞洪,周峰,丁剑平. 充气轮胎的性能与结构[M]. 广州:华南理工大学出版社,1998:283-300.
- [7] 俞洪,丁剑平,张安强,等. 子午线轮胎结构设计与制造技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006:213-217.
- [8] 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:2013-03-13

Finite Element Analysis on Ground Contact Performance of Truck and Bus Radial Tire

FENG Lin-ge, LI Wen-bo, XIN Zhen-xiang

(Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: The three dimensional model for 11.00R20 truck and bus radial tire in the ground contact area was established by using Abaqus finite element analysis software, and the ground contact performance of the tire was investigated. When the inflation pressure increased, the load value also increased at which the contact stress distribution started to distort into the distribution of low stress in the middle and high stress on the edge. As the tire deformation increased, the contact area transformed from ellipse shape into a rectangle, and the high pressure area shifted from the center part of contact area to tire shoulder. Among different operation conditions, the ground contact area under static state was the biggest. Under free rolling, with increase of speed, the longitudinal length of ground contact area increased, the horizontal length decreased, but the total contact area increased, and the counterforce also increased. The influence of friction coefficient on the free rolling radius of the tire was not significant. However, when the friction coefficient increased, the longitudinal shear stress increased, and thus the tread wore out faster. As the slip angle increased, the high stress area moved to one side, and the shape of contact area changed to a triangle.

Key words: truck and bus radial tire; free rolling; contact stress; finite element analysis

欢迎订阅《轮胎工业》《橡胶工业》杂志、刊登广告