# 载重子午线轮胎胎面磨耗有限元分析

赵亚元[1]，王　伟[1,2*]

（1. 青岛科技大学 橡塑材料与工程教育部重点实验室，山东 青岛　266042；2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室，辽宁 大连　116024）

**摘要**：考虑轮胎的几何、材料以及接触非线性，借助ABAQUS非线性有限元软件建立11.00R20载重子午线轮胎轴对称模型和三维有限元模型，计算得到标准工况下胎面的平均磨耗率，并分析气压、负荷以及行驶速度对胎面磨耗的影响。结果表明：标准工况下轮胎每行驶1万km胎面平均磨耗量（单位磨耗量）大约为1.08 mm；实际气压与标准气压的比值过低或过高都会加剧轮胎的磨耗；轮胎负荷低于标准负荷时，轻微加剧胎冠中心处的磨耗；高于标准负荷时胎肩单位磨耗量明显提高；随着行驶速度的提高，胎面单位磨耗量接近线性增大。

**关键词**：载重子午线轮胎；胎面磨耗；磨耗模型；有限元分析

**中图分类号**：U463.341$^{+}$.3/.6；O242.21　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-890X(2016)07-0421-04

轮胎作为汽车的唯一接地部件，要支承车辆本身及载质量、缓冲来自路面的冲击、确保行驶安全性和乘坐舒适性等[1]。耐久性直接决定了轮胎的使用寿命和更换时间。作为耐久性最重要的指标，耐磨耗性还会影响轮胎的操纵安全性及相关性能。例如随着轮胎胎面磨耗行为的发生，花纹块厚度不断减小，轮胎在湿滑路面上的抓着力、排水能力下降，与路面的作用力降低，制动距离变大，安全性降低[2]。早在20年前，国外学者就已经开始使用有限元法分析胎面的磨耗性能。S. Knisley[3]通过大量试验建立了接触摩擦能与胎面质量损失之间的关系式，试验与有限元分析结果一致。J. C. Cho等[4]使用显式有限元法分析了胎面的磨耗分布。K. R. Smith等[5]建立了室内胎面磨耗变形与稳态有限元法得到的摩擦能之间的关系。近几年来，国内很多学者也开始对胎面磨耗特性进行了有限元分析[2,6-9]。轮胎磨耗是复杂的物理化学现象，轮胎设计、使用条件等都会对其产生影响。国内外学者通过大量的实验对这些影响因素进行了考察，并得出了相近的规律[10-14]。

**基金项目**：国家自然科学基金资助项目（21274072，51103077）；工业装备结构分析国家重点实验室开放基金资助项目（GZ1213）

**作者简介**：赵亚元（1990—），女，山东德州人，青岛科技大学在读硕士研究生，主要从事子午线轮胎有限元分析研究。

*通信联系人

本研究通过有限元法预测标准工况下11.00R20载重子午线轮胎的胎面磨耗性能，并分析气压、负荷以及行驶速度对胎面磨耗的影响，得出相应的变化规律。

## 1　轮胎有限元模型

根据11.00R20载重子午线轮胎材料分布图，得到平面轴对称网格模型，如图1所示。采用INP文件对平面轴对称模型进行旋转得到三维模型，如图2所示。

模型共有454 079个节点、262 051个单元，橡胶材料（除胎面胶外）均采用不可压缩的Yeoh材料模型，单元类型选用C3D8H和C3D6H；胎面胶因采用自适应网格技术，假设为弹性体材料，单元类型为C3D8和C3D6；胎圈钢丝单元类型选用C3D8R；

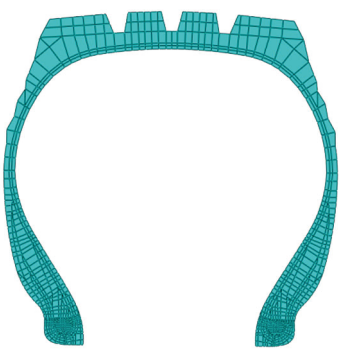

**图1　轮胎平面网格模型**

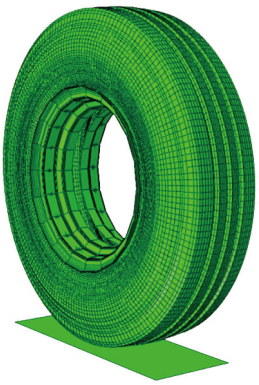

图2 轮胎三维有限元模型

橡胶-帘线复合材料使用Rebar材料模型，单元类型选用SFM3D4R。轮辋和路面定义为刚性面，其中轮胎与地面的摩擦因数为0.5。轮胎与轮辋的装配过程通过轮辋向内移动实现；充气过程通过在气密层线性施加压力实现，11.00R20载重子午线轮胎的标准充气压力为930 kPa。另外，在路面控制点施加34.79 kN的标准垂直负荷，轮胎滚动过程中的速度为100 km·h$^{-1}$。最后轮胎的磨耗分析通过将Archard磨耗模型写入ABAQUS非线性有限元软件的UMESHMOTION子程序来实现。

## 2 结果与讨论

标准静负荷下轮胎模拟与测试结果如表1所示。从表1可以看出，模拟与试验结果吻合较好。

表1 标准静负荷下轮胎模拟与测试结果比较

| 项 目 | 模拟 | 实测 | 相对误差/% |
|---|---|---|---|
| 充气外直径/mm | 1 085.5 | 1 088.6 | 0.28 |
| 充气断面宽/mm | 287.0 | 289.0 | 0.69 |
| 接地印痕面积/cm$^2$ | 41.99 | 42.84 | 1.98 |
| 下沉量/mm | 33.09 | 34.30 | 3.53 |

### 2.1 标准工况下胎面磨耗分析

11.00R20载重子午线轮胎在标准工况下行驶1万km后和新胎断面变形如图3所示。从图3可以看出，磨耗后胎面花纹高度明显降低。

胎面接地区应变能密度分布如图4所示。从图4可以看出，制动工况下胎面中间花纹块及胎肩部位应变能密度较大，花纹块底部应变能密度最大，说明轮胎在制动时胎肩部位和花纹块底部及表面易出现破坏。制动工况下，胎面各花纹块在滑动方向前端应变能集中。

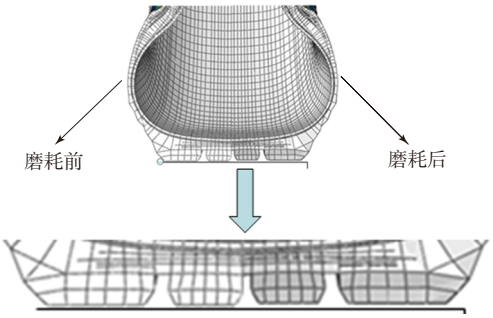


图3 磨耗前后轮胎断面变形

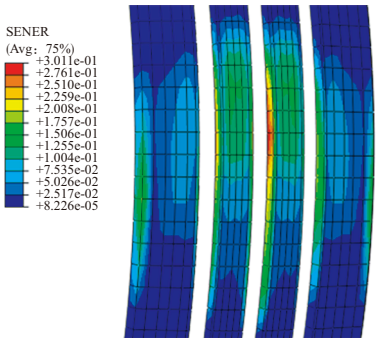


图4 标准工况下轮胎制动时胎面接地区应变能密度分布

提取图3断面上接地处各节点磨耗前后的节点值、接触滑移率、接触压力，根据ABAQUS中Archard模型磨耗率的计算公式，可以计算11.00R20载重子午线轮胎胎面的平均磨耗率($h$，胎面宽度为206.4 mm)。

$$h=\frac{k\sum_{i=1}^{N}P_i\gamma_i\Delta S_i}{H\sum_{i=1}^{N}\Delta S_i}$$

式中，$k$为磨耗系数，取值为$1.1\times10^{-4}$；$H$为材料硬度系数，取值为2 GPa；$P$为接触压力；$\gamma$为接触滑移率；$\Delta S$为节点接触面积；$i$为节点编号。

根据上式计算的平均磨耗率结果($h=2.996\times10^{-6}$ mm·s$^{-1}$)，可以求出11.00R20载重子午线轮胎以速度100 km·h$^{-1}$行驶1万km后胎面平均磨耗(单位磨耗量)大约为1.08 mm。胎面胶厚度为14.5 mm，磨耗标志高度为2.4 mm，轮胎行驶里程大约为11.2万km。而该规格多条轮胎经实际道路测试得出，在正常路面上的行驶里程平均为10万km左右，模拟结果与实测结果相差不大。

### 2.2 气压对胎面磨耗的影响

气压率是实际气压与标准气压的比值。11.00R20载重子午线轮胎单位磨耗量与气压率之

间的关系曲线如图5所示。

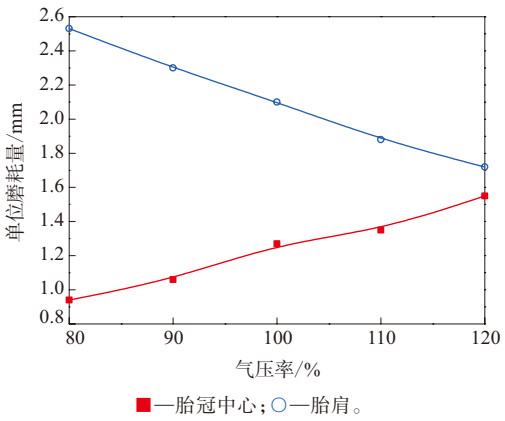


**图5　轮胎气压率对胎面单位磨耗量的影响**

从图5可以看出：气压率低于100%时，轮胎胎肩磨耗严重；高于100%时，胎冠中心处磨耗逐渐加重。二者都会导致胎面的不均匀磨耗，降低轮胎的使用寿命，这与轮胎的实际磨损情况一致。

## 2.3　负荷对胎面磨耗的影响

考虑到轮胎的对称性，只选取模型一半接地面上胎肩到胎冠中心5个不同位置胎面胶厚度的变化来考察负荷对胎面各部位磨耗的影响，结果如图6所示。

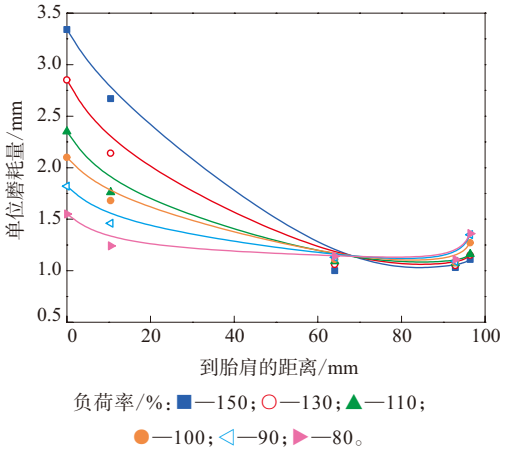


**图6　负荷对胎面单位磨耗量的影响**

从图6可以看出：实际负荷低于标准负荷时，胎冠中心处磨耗稍微增大，胎肩磨耗得到改善，但是轮胎的使用效率下降；超载时胎肩磨耗明显提高，这是由于负荷过大使轮胎变形严重造成的。负荷率为150%时，轮胎胎肩单位磨耗量从100%负荷率下的2. 1 mm提高到3. 3 mm，提高了57%，这与文献[11]中的试验结果吻合。

不同负荷下胎面接地区应变能密度分布如图7所示。

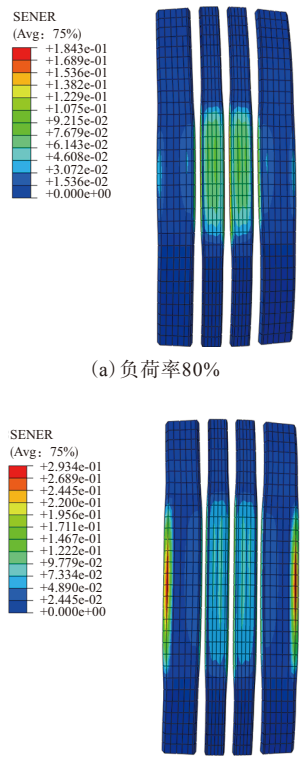


**图7　不同负荷下胎面接地区应变能密度分布**

从图7可以明显看出，随着负荷的增大，应变能从胎冠中心向胎肩转移。

## 2.4　行驶速度对胎面磨耗的影响

轮胎行驶速度对胎面单位磨耗量和行驶里程的影响如图8所示。

从图8可以看出，随着行驶速度的提高，轮胎

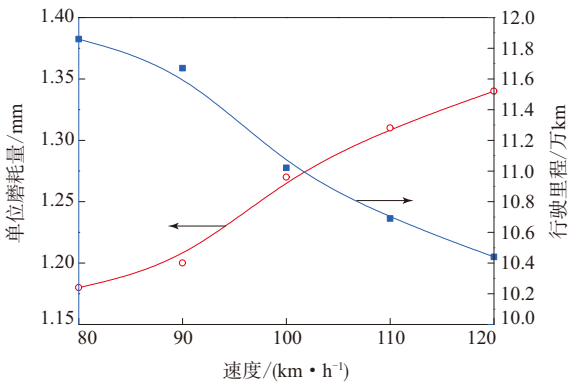


**图8　行驶速度对胎面单位磨耗量和行驶里程的影响**

单位磨耗量明显增大，行驶里程则接近线性降低。这与文献[11-12]中的试验结果一致。可见轮胎的行驶速度对轮胎行驶里程有重要影响。

## 3 结论

通过对11.00R20载重子午线轮胎进行胎面磨耗的有限元分析，得到以下结论。

(1)标准工况下，轮胎胎面单位磨耗量大约为1.08 mm。制动过程中，胎肩、胎面花纹块表面和底部易发生破坏。

(2)气压对胎面磨耗产生重要影响。实际气压与标准气压的比值低于100%时，肩部磨耗严重；高于100%时，胎冠中心处磨耗加重。这与实际使用情况一致，因此在轮胎使用过程中保持正常胎压可以延长轮胎的使用寿命。

(3)轮胎负荷低于标准负荷时，稍微加剧胎冠中心处的磨耗；超载时却因轮胎变形过大胎肩单位磨耗量明显提高。负荷率为150%时，轮胎胎肩单位磨耗量从负荷率100%下的2.1 mm提高到3.3 mm，提高了57%。

(4)随着轮胎行驶速度的提高，胎面单位磨耗量明显增大，行驶里程呈近似线性降低的趋势。

**参考文献：**

[1] 辛振祥，邓涛，王伟. 现代轮胎结构设计[M]. 北京：化学工业出版社，2011：1-2.
[2] 李钊. 轮胎胎面磨耗行为的实验研究与数值分析[D]. 北京：中国科学技术大学，2013.
[3] Knisley S. A Correlation between Rolling Tire Contact Friction Energy and Indoor Tread Wear[J]. Tire Science and Technology，2002，30(2)：83-99.
[4] Cho J C，Jung B C. Prediction of Tread Pattern Wear by an Explicit Finite Element Model[J]. Tire Science and Technology，2007，35(4)：276-299.
[5] Smith K R，Kennedy R H，Knisley S B. Prediction of Tire Profile Wear by Steady-State FEM[J]. Tire Science and Technology，2008，36(4)：290-303.
[6] 何涛，李子然，汪洋. 子午线轮胎胎面花纹块滑动磨损有限元分析[J]. 工程力学，2010，27(7)：237-243.
[7] 董保利. 滚动轮胎稳态磨损及其主要影响因素分析[D]. 上海：同济大学，2009.
[8] 王伟，胡晓军，赵树高. 子午线轮胎接触摩擦问题有限元分析[J]. 弹性体，2008，18(1)：13-17.
[9] 吴健，王泽君，王友善，等. 基于摩擦功的全钢载重子午线轮胎的磨耗性能研究[J]. 橡胶工业，2013，60(2)：80-84.
[10] 吴道兰. 轮胎磨耗的影响因素[J]. 橡胶工业，1991，38(4)：237-244.
[11] 吴道兰. 使用条件对轮胎磨耗的影响[J]. 橡胶工业，1995，42(11)：693-698.
[12] 张伯顺. 环境温度和汽车行驶速度对轮胎磨耗的影响[J]. 汽车与配件，1999(52)：27-27.
[13] Brenner F C，Scheiner S R，Akira K. Effect of Tire Wear on Wear Rate[J]. Tire Science and Technology，1975，3(4)：235-351.
[14] Gent A N，Walter J D. 轮胎理论与技术[M]. 危银涛，李勇，冯希金，等，译. 北京：清华大学出版社，2013：395-406.

**收稿日期**：2016-01-16

# Finite Element Analysis on Tread Wear of Truck Radial Tire

*ZHAO Yayuan*[1]，*WANG Wei*[1,2]

(1. Qingdao University of Science and Technology，Qingdao 266042，China；2. Dalian University of Technology，Dalian 116024，China)

**Abstract**：Considering the geometric，material and contact nonlinearities of tires，an axisymmetric model and a three-dimensional model for 11.00R20 truck radial tire were constructed by using the nonlinear finite element analysis software ABAQUS. The average wear rate of tread was obtained under standard condition. Moreover，the effects of inflation pressure，load and speed on tread wear were discussed. The results showed that，the average tread wear was 1.08 mm per 10 000 km (i.e. unit abrasion) under standard condition. Higher or lower ratio of actual pressure to standard pressure resulted in the increase of tire wear. When the load was lower than the standard load，it would cause slightly severe wear at the center of crown. On the contrary，the unit abrasion at the shoulder would increase obviously. In addition，with the increase of speed，the unit abrasion of tread increases linearly.

**Key words**：truck radial tire；tread wear；wear model；finite element analysis