

# 子午线轮胎自由旋转的非线性有限元分析

王伟,邓涛,赵树高

(青岛科技大学 高分子科学与工程学院,山东 青岛 266042)

**摘要:**根据全钢载重子午线轮胎的实际结构,考虑轮胎的材料非线性、接触非线性以及大变形等力学特性,借助 MARC 有限元分析软件,建立子午线轮胎的非线性有限元分析模型,并以此模型分析了轮胎在充气压力及离心载荷下的应力-应变场、接触及变形情况。分析结果与实际情况相符。

**关键词:**子午线轮胎;离心载荷;非线性有限元分析

**中图分类号:**U463.341<sup>+</sup>.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-890X(2004)08-0481-04

轮胎是几何结构和受力状况复杂、材料分布不均匀的结构部件。在使用中,轮胎要承受内压、离心载荷、轮胎与轮辋和地面间的摩擦力以及周期性变化的非对称负荷。另外,轮胎具备典型的材料非线性、接触非线性以及大变形等复杂的力学特性。国内外许多科研人员正致力于利用有限单元法这一强大的数值计算方法,借助高性能计算机来解决轮胎使用中非常复杂的工程问题,并取得了许多研究成果<sup>[1,2]</sup>。

轮胎的自由旋转分析是一个很有实际意义的问题。粘有泥浆或雪的轮胎滚动时下沉量非常小,甚至没有,但仍然可以高速滚动,因而产生较大的离心力。对离心力作用下的轮胎进行分析,有助于了解胎圈钢丝断裂和带束层边缘脱层的机理,为防止帘线遭受压缩等设计提供非常有用的信息<sup>[3]</sup>。

## 1 离心载荷作用下轮胎有限元模型的建立

在对自由旋转轮胎进行分析时,假设参考轴固定在轮胎上并与轮胎一起转动,这样可以使离心力的合力作为轮胎的体积力沿轮胎的径向作用。体积力或离心力  $F_c$  可表示为:

$$F_c = \omega_z^2 M r \quad (1)$$

式中  $\omega_z$ ——角速度;

$M$ ——整体质量矩阵;

$r$ ——当前位置矢量,包括未变形轮廓的位置矢量  $X$  和节点位移增量  $q$ ,即

$$r = X + q \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得:

$$F_c = \omega_z^2 M X + \omega_z^2 M q \quad (3)$$

平衡方程可用矩阵表示:

$$K q = R - F \quad (4)$$

式中  $K$ ——当前构形时的整体切线刚度矩阵;

$R$ ——负荷增量,变形后轮廓上施加的外部节点负荷;

$F$ ——由收缩轮廓内应力引起的等效节点力。

自由旋转轮胎的离心力  $F_c$  可视为附加的外部载荷,这样式(4)可修正为:

$$(K - \omega_z^2 M) q = R + \omega_z^2 M X - F \quad (5a)$$

或简写成:

$$K^* q = R^* \quad (5b)$$

## 2 材料模型

### 2.1 橡胶材料

对于橡胶类物理非线性材料,可用 Mooney-Rivlin 模型来描述:

$$W(I_1, I_2) = \sum_{i,j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (6)$$

式中  $W$ ——应变能密度;

$C_{ij}$ ——Rivlin 系数;

$I_1, I_2$ ——第1和第2格林应变不变量。

**基金项目:**山东省自然科学基金重点资助项目(Z99F05)

**作者简介:**王伟(1971-),男,山东泰安人,青岛科技大学在读硕士研究生,主要从事轮胎结构有限元分析及其应用的研究。

另外, Yeoh<sup>[4]</sup>根据炭黑填充胶料试验数据指出,  $\frac{\partial W}{\partial I_2}$  远远小于  $\frac{\partial W}{\partial I_1}$ , 且接近于零(不等于零), 采用不变量  $(I_1 - 3)$  与应变能密度  $W$  的三次方程能够很好地描述炭黑填充胶料的弹性力学行为:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (7)$$

式中,  $C_{10}$ ,  $C_{20}$  和  $C_{30}$  为 Rivlin 系数, 可根据橡胶材料单轴拉伸试验确定<sup>[5]</sup>。

橡胶材料单轴拉伸时, 式(7)可转化为如下的应力-应变关系:

$$\frac{\sigma}{\lambda - \lambda^{-2}} = C_{10} + 4C_{20}(I_1 - 3) + 6C_{30}(I_1 - 3)^2 \quad (8)$$

式中,  $\lambda$  为主伸长率,  $I_1 = \lambda^2 + 2\lambda^{-1} - 3$ 。

## 2.2 帘线-橡胶复合材料

轮胎中的帘线-橡胶复合材料可视为正交各向异性材料, 材料参数由 Ekvall 公式<sup>[6]</sup>及试验给出。在进行非线性有限元分析时, 采用复合材料壳单元模型来描述。

## 2.3 钢丝圈

钢丝圈采用 MARC 软件中的加强筋单元模型描述。钢丝视为各向同性的金属材料, 杨氏弹性模量  $E = 2.1 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\mu = 0.3$ , 密度  $\rho = 7.85 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。钢丝附胶用 Yeoh 模型来描述, 材料参数由单轴拉伸试验得到。

# 3 有限元分析模型的建立

## 3.1 三维有限元模型的建立

本研究以 10.00R20 全钢载重子午线轮胎为例进行非线性有限元分析。根据轮胎的实际结构, 考虑了轮胎各部位如胎面胶、胎侧胶、胎肩垫胶、三角胶、正交各向异性的钢丝帘线-橡胶复合材料和钢丝圈等 19 种材料。带束层和胎体采用轴对称复合材料壳单元、钢丝圈用加强筋单元、其它部位如胎冠和胎侧等采用四节点轴对称实体单元进行计算。由于轮胎结构和载荷对称, 利用轴对称模型仅取一半进行研究, 大大减小了计算量。模型共有 287 个节点 333 个单元。平面轴对称模型如图 1 所示。

## 3.2 边界条件

在对自由旋转轮胎分析时, 由于轮胎结构和

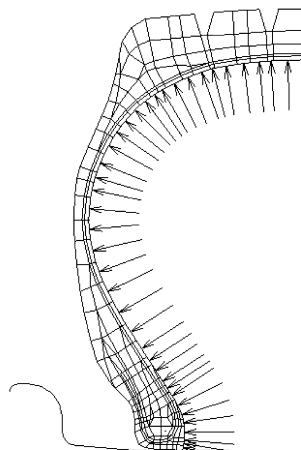


图 1 轮胎有限元分析模型

载荷对称, 仅取一半进行分析, 需在对称面上施加对称边界条件, 即令对称面上的节点在  $x$  方向上的位移为零。另外, 在胎圈部位施加轮胎与轮辋接触高度非线性边界条件, 可利用 MARC 软件中的直接约束法求解。然后, 施加气压逐步达到标准气压, 最后对整个轮胎施加离心载荷。

## 3.3 加载方法

由于胎圈与轮辋是过盈配合, 因此先将轮辋沿轮胎轴线向外平移 50 mm, 使胎圈与轮辋有一定间隙, 然后将轮辋沿轴向缓慢移动至装配位置。自由充气时, 轮胎变形属于大变形, 采用分步缓慢加载, 使充气压力始终垂直于轮胎内表面, 最后达到标准气压 800 kPa, 避免因加载过大而引起刚度矩阵奇异, 并在此过程中完成轮胎与轮辋的接触分析, 最后施加离心载荷。

# 4 结果分析

首先模拟轮胎与轮辋的装配过程, 分 50 个步长, 使轮胎与轮辋逐渐接触, 最后到达装配位置, 接触及变形状况如图 2 和 3 所示。从图 2 和 3 可以看出, 胎圈与轮辋的接触部位在胎圈底部和外侧, 这与实际情况是相符的。

完成轮辋定位后, 再逐步施加内压直至达到 800 kPa, 然后开始旋转(转速为  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )。轮胎在标准气压及离心载荷下的断面宽和外直径如表 1 所示。

从表 1 可看出, 在离心载荷下, 轮胎的直径有

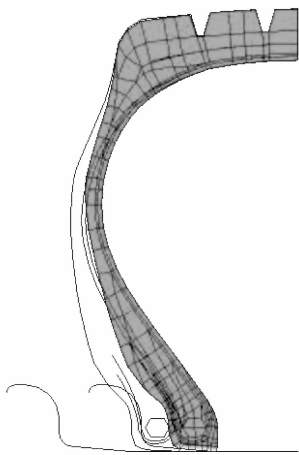


图 2 轮胎与轮辋到达装配位置时的接触及变形

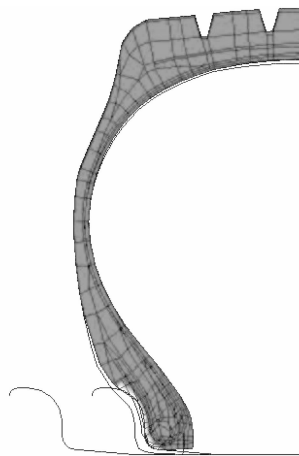


图 3 轮胎充气压力为 800 kPa 时的接触及变形

表 1 计算结果和试验结果的比较 mm

| 项 目         | 测量值   | 计算值      | 国家标准        |
|-------------|-------|----------|-------------|
| 轮胎外直径       |       |          |             |
| 在充气压力下      | 1 050 | 1 050.20 | 1 055±12.66 |
| 在充气压力和离心载荷下 |       | 1 050.85 |             |
| 轮胎断面宽       |       |          |             |
| 在充气压力下      | 273   | 277.96   | 279±8.37    |
| 在充气压力和离心载荷下 |       | 277.42   |             |

所增大,而断面宽减小,与实际情况相符。轮胎的负荷主要由带束层和胎体承担,如图 4 所示。在离心载荷作用下,带束层的周向应力分布如图 5 所示,第 1,2 和 3 带束层的应力在胎面中部较大,然后向带束层边缘逐渐减小,分布规律基本一致。第 2 带束层受力最大(最大值为 21.6 MPa),然后依次是第 3 和 1 带束层。该应力分布规律与文献

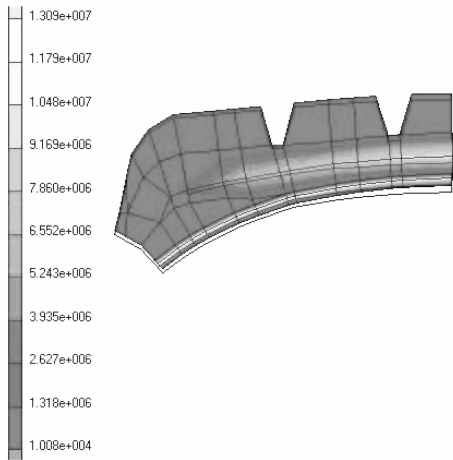


图 4 轮胎在离心载荷作用下的等效柯西应力分布

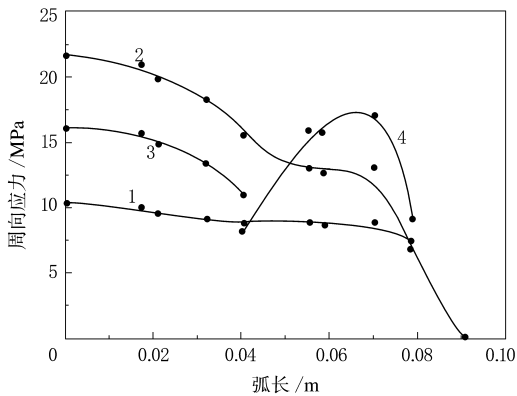


图 5 在离心载荷下带束层的周向应力分布

1—第 1 带束层;2—第 2 带束层;3—第 3 带束层;4—0°带束层。  
[7]是一致的。0°带束层在胎面中部应力较大,在边缘处较小。

在离心载荷下,轮胎带束层的剪切应力分布如图 6 所示。从图 6 可以看到,第 1 和 2 带束层的剪切应力较大,并且方向相反,主要是由于帘线角度方向相反所致。胎面中部剪切应力较大(分别约为 2.6 和 4.7 MPa),然后逐渐减小,到带束层边缘为零;第 3 带束层剪切应力在胎面中部较大,然后下降较快,最大值约为 2.5 MPa;0°带束层由于帘线角度为零,因此两层之间无剪切应力。

### 5 结论

根据轮胎及载荷的对称性,建立轴对称非线性有限元模型,模拟了轮胎与轮辋的装配、自由充气 and 自由旋转过程,得出以下结论。

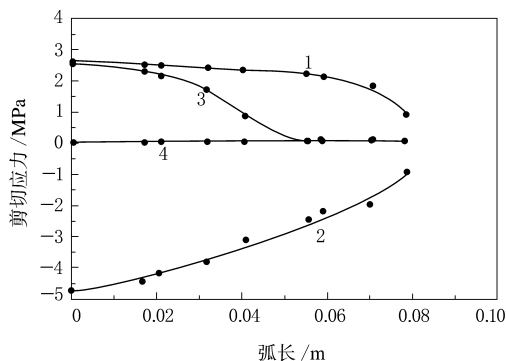


图6 在离心载荷下带束层的剪切应力分布

注同图5。

(1)充气结束后,胎圈与轮辋的接触情况与实际情况相符。

(2)自由充气后轮胎的断面宽和外直径与实测值十分接近。

(3)在离心载荷作用下带束层周向应力和剪切应力分布为:第1,2和3带束层在胎面中部较大,向边缘逐渐减小,分布规律基本一致;第2带束层受力最大,然后依次是第3和1带束层。

由此可见,本研究所建模型是比较合理的。

随着测试仪器和测试方法的不断改进以及对轮胎材料粘弹性本构关系研究的不断深入,有限元法必将成为轮胎设计的强有力工具。

### 参考文献:

- [1] Ridha R A, Theves M. 轮胎力学进展[J]. 刘大众译. 轮胎工业, 1995, 15(12): 737-746.
- [2] 李丽娟, 刘 锋, 苏秀平. 轮胎结构力学设计理论研究进展[J]. 轮胎工业, 2000, 20(10): 579-587.
- [3] Satyamurthy D, Hirschfeld L R. An axisymmetric finite element and its use to examine the effects of construction variables on radial tires[J]. Tire Science and Technology, 1987, 15(2): 97-122.
- [4] Yeoh O H. Characterization of elastic properties of carbon black filled rubber vulcanization[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1990, 63(5): 792-805.
- [5] 王登祥. 轮胎胶料有限元分析的实验基础及计算[J]. 轮胎工业, 1998, 18(12): 721-729.
- [6] 朱兴元, 谢志民, 阎桥, 等. 子午线轮胎带束层弹性常数预报[J]. 轮胎工业, 1998, 18(1): 20-23.
- [7] Kennedy R H. Radial truck tire inflation analysis[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1981, 54(4): 751-756.

收稿日期: 2004-02-26

## Nonlinear FEA of radial tire in free rotation

WANG Wei, DENG Tao, ZHAO Shu-gao

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

**Abstract:** Based on the real structure of BTR tire, a nonlinear FEA model of tire was established by the aid of MARC FEA software considering the mechanical characteristics of tire, such as material nonlinearity, contact nonlinearity and large deformation and so on. The stress-strain field, contact and deformation conditions of tire under inflation and centrifugal load were analyzed. The results were in accordance with the real conditions.

**Keywords:** BTR tire; centrifugal load; nonlinear FEA

### 双星与青岛高校软控合作开发“轮胎企业管控网络软件系统”

中图分类号: F270.7 文献标识码: D

近日, 双星集团与青岛高校软控股份有限公司就合作开发“轮胎企业管控网络软件系统”举行了签约仪式。

轮胎企业管控网络软件系统是一套涵盖轮胎

生产全过程的管理控制网络系统, 可有效解决困扰轮胎行业的产品均一性问题, 并可有效降低原材料的消耗, 大幅度提高劳动生产率, 提高我国轮胎行业信息化水平与产品整体质量, 大大增强我国轮胎行业整体竞争力。该系统的合作开发将促进双星轮胎工业有限公司管理水平的提高。

(双星集团 王开良供稿)