

带束层角度对全钢子午线轮胎应力影响的有限元分析

陈蔚 马改陵* 崔文勇
(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 考虑轮胎的几何非线性、橡胶材料的不可压缩性、帘线增强橡胶复合材料的各向异性以及轮胎接触非线性,建立了 9.00R20 规格全钢丝载重子午线轮胎的有限元分析模型,并分析了带束层角度对充气 and 垂直载荷两种工况下的带束层钢丝帘线第一主应力的影响;得出不同工况及不同角度改变方案下的带束层上最大应力节点的 S_1 变化趋势,可为实际工程提供理论指导。

关键词: 全钢丝载重子午线轮胎; 带束层角度; 钢丝帘线; 第一主应力 (S_1); 有限元分析

中图分类号: O242.21

引言

全钢丝载重子午线轮胎是由多种橡胶材料和骨架材料(胎圈钢丝、钢丝帘线等)组成的复杂的柔性结构。对子午胎而言,带束层对轮胎的力学性能有较大影响。带束层的结构、帘线铺设角等进行很小的改动,可能使轮胎的力学性能发生显著的变化。近年来基于有限元分析技术提出了一系列的新的轮胎设计理论,如 RCOT(Rolling Contour Optimization Theory)滚动轮廓优化设计理论、动态稳定性最佳接地理论、应力最佳轮廓设计理论等,这些设计理论也都十分重视带束层帘线的作用及受力状况^[1-2]。因此了解带束层的工作状态对子午线轮胎的设计有着重要的指导意义和应用价值。

本文采用 MSC/Marc/Mentat 有限元分析和建模软件建立了全钢丝载重子午线轮胎(9.00R20)的三维非线性有限元模型并进行了分析,在模型中充分考虑到轮胎结构的复杂性、轮胎变形的几何非线性、轮胎与地面接触的载荷非线性。

1 有限元模型的建立和验证

全钢丝载重子午线轮胎的结构复杂,根据其实际结构,在有限元模型中的相应部位定义不同的材

料性能,其中,橡胶采用不可压缩 mooney-Rivlin 材料模型进行模拟,钢丝帘线采用各向同性弹性材料进行模拟。选用实体单元模拟轮胎各部位橡胶材料包括帘布层基体材料,采用 Rebar 单元模拟钢丝帘布层,Rebar 单元是一些可在里面放置单方向的应变膜元(加强芯或杆,本模型中是钢丝帘线)的中空单元,MSC. Marc. 中任意材料都可以用于模拟 Rebar 单元。Rebar 与其他实体单元(填充物,本模型中是指帘布层中的橡胶基体)联合使用来代表加筋材料(即钢丝增强橡胶复合材料)。Rebar 单元既可用于加强芯是小应变也可用于是大应变的情形。本文根据 9.00R20 全钢丝载重子午线轮胎的实际结构,建立相应的有限元模型。

1.1 二维模型(充气工况)

轮胎为轴对称结构,且充气为轴对称载荷,因此充气工况的分析只需采用轴对称单元建立二维的轴对称模型即可(如图 1 所示),这样可以节省大量计算机时。轮胎的二维轴对称模型反映了轮胎断面的

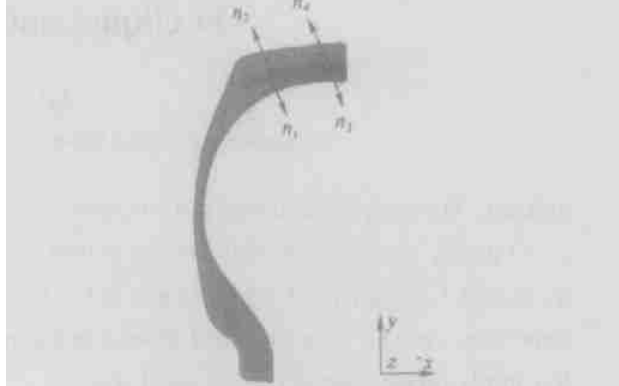


图 1 轮胎二维有限元模型

Fig. 1 2D finite element model of tire

收稿日期: 2004-12-30

基金项目: 北京市重点项目(951401900)

第一作者: 女, 1977 年生, 硕士生

*通讯联系人

E-mail: cuiwy@mail.buct.edu.cn

材料分布,在带束层端部、胎体反包处和胎圈等结构复杂处,轮胎易损坏,节点分布相对密集。图 1 所示的 n_1, n_2, n_3, n_4 四节点为本文选择的应力分析节点。二维模型变形结果如表 1。

表 1 轮胎充气工况变形结果
Table 1 Deformation results of tire under a
inflated pressure

	变形前 计算值	变形后 计算值	变形后 实验值	相对偏 差/ %
外直径/ mm	1 015	1 018.914	1 021.1	0.21
断面宽/ mm	253.8	262.602	262.1	0.19

注:充气压力为 0.81 MPa。

由表 1 分析可以看出,由有限元分析计算得出的结果与实验数据有较好的吻合,说明模型的建立是合理的^[3]。

1.2 三维模型(接地工况)

在静态接地状态下,轮胎几何结构对称,但是载荷不对称,除了承受对称的充气内压之外,还在轮胎的旋转中心处受向下的垂直负荷,故轮胎接地工况的分析需要建立三维有限元模型,橡胶材料采用 Herrmann 三维实体单元,钢丝帘线采用 Rebar 膜单元。考虑轮胎与路面的接触边界,而将轮胎胎趾至轮辋接触区域的接触问题简化为固定约束,因为本文重点分析三角胶端点以上部分的应力,根据圣维南原理,在距离简化约束部位较远处的应力-应变结果基本不受影响^[4]。

考虑到轮胎承受垂直载荷的左右对称性,三维模型的建立只需取 1/2 个轮胎,如图 2 所示。与轮

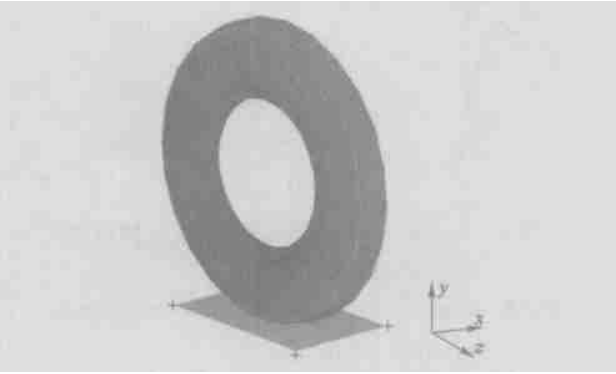


图 2 接地工况三维有限元模型

Fig. 2 3D finite element model of tire under static contact

胎材料相比,路面可视为刚体,在图 2 中以长方形平面来表示。在轮胎的接地三维模型中,有可能发生

接触的区域单元划分密集,而在其他区域内单元布置相对稀疏^[5]。

2 计算结果分析

本文所建立的全钢丝载重子午线轮胎的带束层结构为 3 层,因第 1、2 层(由内向外)承受载荷较大,第 3 层主要起缓冲作用,因此这里主要研究第 1、2 层带束层钢丝帘线角度的变化对于不同载荷工况下应力的影响。为此,分别改变第 1 层、第 2 层的钢丝帘线角度 β_1, β_2 和同时改变第 1 层和第 2 层钢丝帘线角度进行计算,并分别分析充气工况和接触工况下帘线的第一主应力 S_1 的变化情况。

2.1 充气工况下带束层角度对应力的影响

带束层帘线角度以轮胎左右对称中心面为基准,钢丝帘线角度的正负只是相对而言,本模型 2、3 层带束层角度均为正值,因此 β_1 为负表示与第 2 层角度方向相反。由于帘线各处应力变化不一,在对带束层帘线应力分析中,只讨论带束层第一层的节点 n_1 和第二层的节点 n_2 ,如图 1 所示。该两点分别是第一、第二层的最大第一主应力点。

在额定气压 0.81 MPa 下,改变第 1 层钢丝帘线的角度 β_1, n_1 和 n_2 的第一主应力变化如图 3 所示,图 3 左纵坐标代表 n_1 或 n_3 节点的第一主应力 S_1 ,右纵坐标代表 n_2 或 n_4 节点的第一主应力 S_1 ,图 4~9 的纵坐标意义同此。

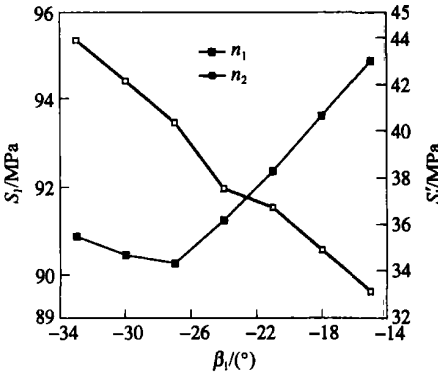


图 3 β_1 对第 1、2 层带束层节点 n_1, n_2 的第一主应力的影响曲线

Fig. 3 Distribution of the first principal stress for n_1 and n_2 at different β_1

由图 3 可以看出,随着第 1 层钢丝帘线角度 β_1 减小, n_1 的第一主应力 S_1 先是减小,当角度在 -27° 左右时达到最小值, $S_{1\min} = 91$ MPa,随后 S_1 逐渐增大,且几乎成线性关系与横坐标夹角大约为

45°; n_2 的第一主应力 S_1 则是逐渐减小,同时可以看出其应力水平大约是第 1 层 S_1 的 $1/3 \sim 1/2$ 。

改变第 2 层钢丝帘线角度 β_2 , n_1 和 n_2 的第一主应力 S_1 和 S_1 变化如图 4。

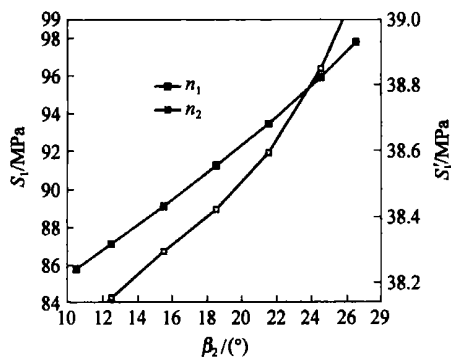


图 4 β_2 对第 1,2 层带束层节点 n_1, n_2 的第一主应力的影响曲线

Fig. 4 Distribution of the first principal stress for n_1 and n_2 at different β_2

由图 4 可以看出,随着第 2 层钢丝帘线角度 β_2 的逐渐增大, n_1 和 n_2 的第一主应力 S_1, S_1 均是逐渐增大,而且 n_1 第一主应力 S_1 的变化几乎成线性关系;而 n_2 的应力水平依然大约是 n_1 的 $1/3 \sim 1/2$ 。但是相比较而言,改变 β_2 使得 n_1 的应力水平比改变 β_1 所得的应力水平略有增大,而 n_2 的应力水平则是略略降低。

若同时改变第 1 层和第 2 层钢丝帘线的角度 β_1, β_2 , 变化又有所不同,如图 5 所示,图 5 下横坐标为 β_1 , 上横坐标为 β_2 。

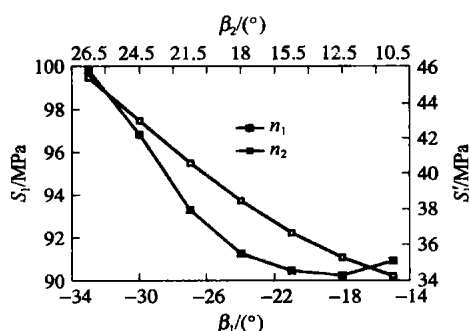


图 5 β_1, β_2 对第 1,2 带束层节点 n_1, n_2 的第一主应力的影响曲线

Fig. 5 Distribution of the first principal stress for n_1 and n_2 at different β_1 and β_2

从图 5 中看出,随着 β_1, β_2 的减小, n_1 的第一主应力 S_1 随之减小,大约在 $\beta_1 = -18^\circ, \beta_2 = 12.5^\circ$ 时候, n_1 第一主应力达到最小值, $S_{1\min} = 90.23$

MPa,而后又有增大趋势;而 n_2 的第一主应力 S_1 则是随之减小。此时 n_1 和 n_2 的应力水平较改变 β_1 所得这两个节点应力水平均略有增大。

在进行轮胎结构设计时,不应当仅仅考虑某一层的帘线的应力,而应当综合考虑,以上的分析可以看出,在 0.81 MPa 充气工况下,选取 $\beta_1 = -18^\circ, \beta_2 = 12.5^\circ$ 是该结构 900R20 全钢丝载质量子午线轮胎带束层 1,2 两层钢丝帘线较佳的铺设角度。

2.2 接触工况下带束层角度对应力的影响

本文以抬高路面来模拟轮胎承受垂直载荷下的接触路面工况,将路面上移 30 mm,分别分析 2.1 中所述三种改变帘线铺设角度方案下的钢丝帘线的第一主应力。此处选择接地断面的第一层节点 n_3 和第二层的节点 n_4 为讨论点,如图 1 所示。因为在垂直载荷工况下位于接近胎冠中心处的该两节点的第一主应力为相应带束层的最大点,在轮胎承受垂直载荷工况下,第一主应力越大帘线承受张力越大,轮胎在该位置越容易产生拉伸破坏。

改变第 1 层钢丝帘线的铺设角度 β_1, n_3 和 n_4 的第一主应力 S_1, S_1 的变化如图 6 所示,从图 6 可以看出,随着第 1 层帘线角度 β_1 的逐渐变小, n_3 的第一主应力 S_1 是逐渐增大,且几乎成线性关系,而 n_4 的第一主应力 S_1 则是较快变小,其变化趋势类似二次抛物线关系。

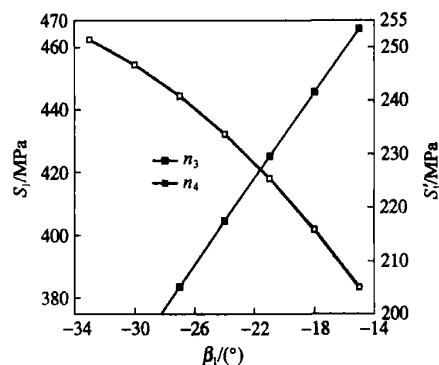


图 6 β_1 对第 1,2 层带束层节点 n_3, n_4 的第一主应力的影响曲线

Fig. 6 Distribution of the first principal stress for n_3 and n_4 at different β_1

改变第 2 层钢丝帘线的铺设角度 β_2 对 n_3 和 n_4 第一主应力的影响的曲线变化趋势与改变 β_1 所得的分析结果相反,如图 7 所示, n_3 的第一主应力 S_1 是随着 β_2 的增大而增大,且几乎成线性关系,而 n_4 的第一主应力 S_1 则是随 β_2 的增大较快减小,其

变化趋势也类似二次抛物线的关系。

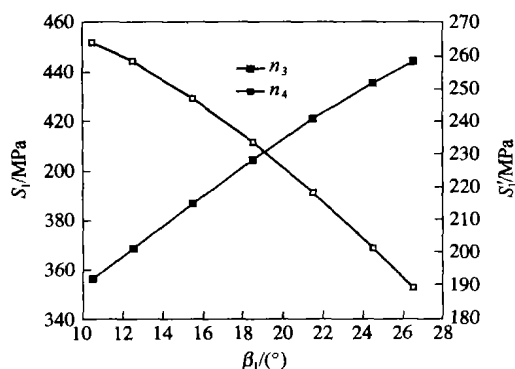


图 7 β_1 对第 1, 2 层带束层节点 n_3, n_4 的第一主应力的影响曲线

Fig. 7 Distribution of the first principal stress for n_3 and n_4 at different β_1

从上面图 6、7 可以看出, 两种铺设角度的改变, 所得的两层钢丝帘线的应力水平相差不大。

若是同时改变 β_1, β_2 , 得出的结果和上面两组完全不同, 如图 8 所示, 与充气工况的分析曲线一样, 图中下横坐标为 β_1 , 上横坐标为 β_2 。从图 8 可以看出, 随着 β_1, β_2 的减小, n_3 的第一主应力 S_1 开始为增大, 且曲线较陡, 当在 $\beta_1 = -30^\circ, \beta_2 = 24.5^\circ$ 左右的时候, 曲线上升开始趋于平缓, 行至大约是 $\beta_1 = -18^\circ, \beta_2 = 12.5^\circ$ 时, 曲线又开始变陡。而 n_4 的第一主应力 S_1 随着 β_1, β_2 的减小是逐渐增大, 且曲线较陡。当曲线行至大约在 $\beta_1 = -18^\circ, \beta_2 = 12.5^\circ$ 时, n_4 的第一主应力 S_1 达到最大值, $S_{1\max}$ 240 MPa, 随后 S_1 逐渐减小。

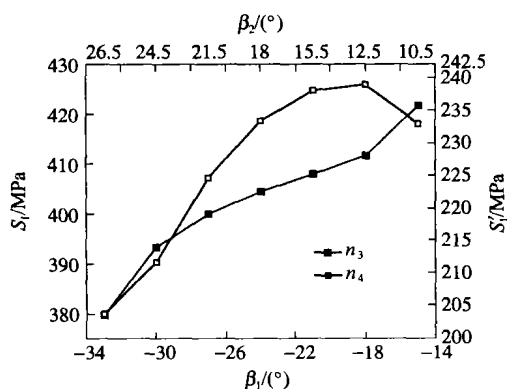


图 8 β_1, β_2 对第 1, 2 带束层节点 n_3, n_4 的第一主应力的影响曲线

Fig. 8 Distribution of the first principal stress for n_3 and n_4 at different β_1 and β_2

对比两种工况, 可以发现钢丝帘线铺设角度的

改变所引起的所研究相应带束层的节点的第一主应力的变化趋势完全不同。但是共同点是铺设角度的改变对所研究的节点的第一主应力值产生很大的影响, 很微小的变化就可以使得节点的第一主应力产生很大的变化。同样的工况下, 因为胎冠部位的胎体帘线承受相对较大的应力, 所以对胎冠处的胎体帘线做一个路径, 同时改变 1、2 层的带束层的铺设角度, 得到 7 个不同带束层帘线角度模型下的胎体帘线的第一主应力的变化曲线, 如图 9, 图 9 横坐标表示从胎冠中心(原点)至胎肩的胎体帘线弧长, 图

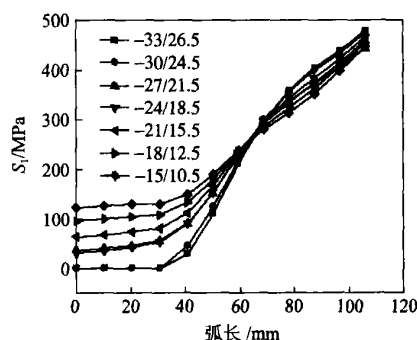


图 9 β_1, β_2 对胎体帘线第一主应力 S_1 的影响

Fig. 9 Distributions of S_1 for seven models with different β_1 and β_2

例表示 7 个模型的第 1, 2 层带束层帘线角度。从图 9 可以看出在距离胎冠中心大约 70 mm 以内的胎体帘线的第一主应力 S_1 是随着 β_1, β_2 增大而减小, 而 70 mm 以外 β_1, β_2 的改变对第一主应力的影响不甚明显。从胎体帘线可以看出 β_1, β_2 越小, 帘线的 S_1 越小。也就是说, 带束层帘线角度变化时, 胎冠处的胎体帘线受影响较大, 并且与胎侧处的胎体帘线所受影响趋势相反, 带束层角度减小, 则胎体帘线整体路径上的变化趋势平缓, 反之, 胎体帘线的应力远远大于胎冠应力, 这也不利于轮胎整体性能, 在实际轮胎设计当中, 应当考虑带束层帘线角度对胎体帘线的这种影响趋势, 根据具体的轮胎使用要求与结构来选择最佳的带束层帘线角度。

3 结论

(1) 本文所建立的全钢丝载重子午线轮胎三维有限元模型的变形计算结果与试验结果吻合良好, 应用该模型进行难以进行试验测试的胎体和带束层帘线的应力分析也是真实可信的。

(2) 带束层帘线角度对帘线的第一主应力有着

明显的影响,并且对充气工况与垂直载荷工况下应力的影响情况不一致,有时甚至完全相反,如本模型中同时减小 α_1 和 α_2 ,第 1 和第 2 层带束层的节点 n_1 和 n_2 的第一主应力在充气工况下均是随之减小,而在接触工况下是随之增大。由于轮胎的实际使用工况是与地面接触并承受垂直载荷,故应用中应当更多地考虑轮胎接地工况下带束层帘线角度对各部位应力的影响。

(3) 在接触工况下,带束层帘线角度的改变对不同部位的应力影响趋势也不同:

减小带束层第 1 层钢丝帘线铺设角绝对值 α_1 ,将会使第 1 层带束层节点 n_1 第一主应力 S_1 的值逐渐增大;而第 2 层带束层节点 n_2 第一主应力 S_1 的值将会逐渐降低;

减小带束层第 2 层钢丝帘线铺设角 α_2 ,将会使第 1 层带束层节点 n_1 第一主应力 S_1 逐渐增大;而第 2 层带束层节点 n_2 的 S_1 逐渐减小;

同时减小 α_1 和 α_2 ,胎体帘线胎冠部位的 S_1 增大,而在距离胎冠中心 70 mm 以外的部分则逐渐减小。

(4) 由于轮胎结构复杂,改变某一部位的局部结构参数,对轮胎的整体应力分布即有显著影响,这就需要在设计中进行综合考虑,然后根据实际性能要求选择合理的结构参数。因此,应用本模型分析的带束层帘线角度对轮胎胎侧以上部位胎体帘布和带束层帘布的应力分析结果,可以对载重子午线轮胎结构优化设计提供一定的理论指导。

参 考 文 献

- [1] 张涛,李兵. 轿车子午胎带束层帘线受力的非线性有限元分析[C]. ABAQUS2004 用户论文集. 北京: ABAQUS 公司,2004. 98 - 101
- [2] 李炜,夏勇,夏源明. 载重子午线轮胎帘线受力的有限元分析[J]. 力学季刊,2002,23(3):323 - 330
- [3] 王华庆. 斜交轮胎静态接地工况的有限元分析[J]. 北京化工大学学报,2002,29(5):65 - 67
- [4] 马改陵. 斜交轮胎充气状态下的层间剪应力分析及材料特性参数对轮胎应力、应变的影响的研究[D]. [硕士学位论文]. 北京:北京化工大学,2001
- [5] 赵国群,程钢,管延锦. 带束层角度对子午胎结构性能影响的三维非线性有限元分析[J]. 工艺装备,2004,14(1):35 - 38

Effect of belt angle on stress of an all steel cord truck radial tire by finite element analysis

CHEN Wei MA Gai-ling CUI Wen-yong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: A three-dimensional FEA model of an all steel cord truck radial tire (9.00R20) was established, taking the geometric nonlinearity, anisotropy of composite and the nonlinearity boundary conditions from the tire-pavement contact into account. The effect of the belt angle on the first principal stress of the tire under two load cases of pressure and vertical loading was analyzed, respectively. And the changing trends of S_1 of the nodes in the belts with a maximum stress under different load cases and belt angles were achieved, which will provide a theoretical guide for engineering practice.

Key words: all steel cord truck radial tire; belt angle; steel wire cord; first principal stress (S_1); finite element analysis (FEA)

(责任编辑 刘同帅)