

子午线轮胎胎冠部位橡胶结构数值模拟

胡山凤, 束永平

(东华大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要:针对 12.00R20 全钢载重子午线轮胎, 基于组合模型技术建立带复杂花纹的全局模型, 基于子模型技术建立胎冠部位具有精细网格的接地区子模型, 并验证其有效性。应用子模型精确模拟静负荷工况下胎冠部位橡胶结构的应力应变特征, 并分析胎冠部位 5 个危险区域的应力情况。结果表明, 子午线轮胎的带束层端部(区域 M)在使用中是最容易破坏的位置, 由于材料及结构均存在突变, 其应力集中和剪切变形在整个胎冠部位是最严重的。基于本研究结果, 提出了改进方法。

关键词:子午线轮胎; 胎冠部位; 橡胶结构; 数值模拟

中图分类号:U463.341⁺.6; O241.82 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-8171(2015)07-0393-06

轮胎胎冠是车辆行驶过程中轮胎与地面接触的唯一部位, 轮胎的多数性能是通过胎冠来完成和体现的^[1]。虽然在超载情况下胎圈部位爆破是载重子午线轮胎常见的破坏形式, 但是子午线轮胎的带束层端部在使用中则是最容易破坏的位置, 常见的破坏方式是裂纹。裂纹扩展主要有两种模式, 一种是裂纹在层间橡胶中扩展, 另一种则是裂纹沿帘线与橡胶的界面扩展。因此, 对胎冠部位橡胶结构危险区域的应力应变进行精细分析, 并改进胎冠部位的应力分布是有必要的。

本研究针对 12.00R20 全钢载重子午线轮胎, 基于组合模型技术建立带复杂花纹的全局模型, 基于子模型技术建立胎冠部位具有精细网格的接地区子模型, 并应用子模型精确模拟静负荷工况下胎冠部位橡胶结构的应力应变特征, 分析胎冠部位 5 个危险区域的应力情况。

1 轮胎有限元模型的建立

1.1 全局模型

采用组合模型技术建立轮胎有限元模型, 即对胎面花纹部分和轮胎主体部分分别建模, 然后通过约束将二者组合成一个完整的轮胎模型。这种建模方法不仅能方便地模拟带复杂花纹的轮胎, 而且可以按区域划分粗细不同的网格, 最终得

到高质量的完全六面体网格模型。

1.1.1 建模方案

对于轮胎主体, 先建立一个子午面内的二维网格, 再利用 * SYMMETRIC MODEL GENERATION 生成三维主体网格。在 AutoCAD 中按 12.00R20 轮胎实际子午面结构进行适当简化后划分区域边界, 并画好网格节点。在简化分区时, 应根据相邻区域材料的力学性能差异程度以及应力梯度的大小进行区分。相邻部分材料的力学性能差异程度较小、应力变化平缓的区域可以合并处理。

将网格节点的 dxf 文件导入到 Hypermesh 中, 构建一个子午面内的二维网格单元, 输出 inp 文件, 所有面单元的法向应保持一致, 否则在定义钢丝帘线角时会出现混乱。在输出的 inp 文件中每一区域赋予相应的材料属性, 带束层和胎体层等帘布层赋予 rebar 模型参数。轮胎主体二维有限元模型如图 1 所示。

本研究基于李兵^[2]提出的类保角映射建模法, 采用修正后的类保角映射簇方法建立胎面花纹, 将真实胎面体沿轴向和周向拉直, 对拉直后的胎面体进行花纹沟剖切, 再对剖切后的花纹块进行网格划分, 对划分好的花纹块网格进行轴向和周向还原, 即可生成高质量的真实花纹块模型, 如图 2 所示。

建立主体和花纹模型后, 使用 tie 约束将二

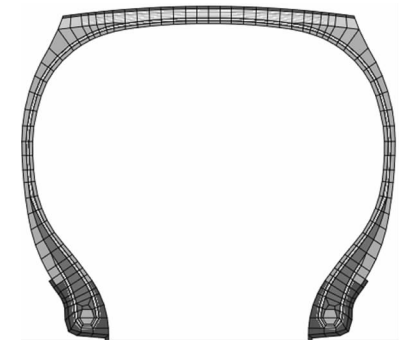


图1 轮胎主体二维有限元模型

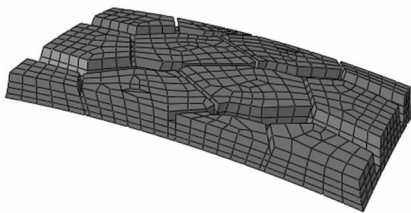


图2 花纹块三维有限元模型

者组合成一个完整的轮胎模型,如图3所示。

1.1.2 材料属性

经试验,本模型的橡胶材料采用 Yeoh 模型拟合结果最佳。Yeoh 模型的橡胶材料参数如表1所示。

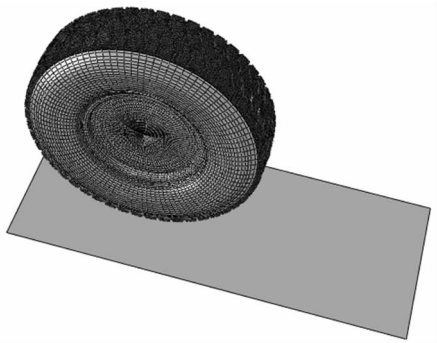


图3 轮胎三维有限元模型

表1 Yeoh模型的橡胶材料参数

橡胶材料	C_{10}	C_{20}	C_{30}
胎面胶	0.801 594	-0.271 428	0.076 817
胎肩胶	0.662 665	-0.202 003	0.061 624
胎侧胶	0.482 510	-0.156 981	0.041 821
三角胶	2.022 238	-0.949 226	0.409 367
胎圈包布胶	1.029 642	-0.350 046	0.117 020
胎体帘布层胶	1.125 489	-0.441 370	0.159 539
气密层胶	1.180 296	-0.417 393	0.147 564
带束层胶	1.029 642	-0.350 046	0.117 020

Yeoh 模型广泛应用于炭黑补强橡胶的非线性有限元分析中。本模型对橡胶基体和帘线分别定义,在进行子午线轮胎有限元分析时,橡胶基体选择 Yeoh 模型。本研究直接引用厂家提供的测试结果。

1.1.3 模型验证

轮胎表面应变及内部帘线受力均难以测量,而其下沉量测量则相对简单。为了验证有限元模型的有效性,计算不同负荷对应的下沉量,并与试验测试结果进行对比,如图4所示。

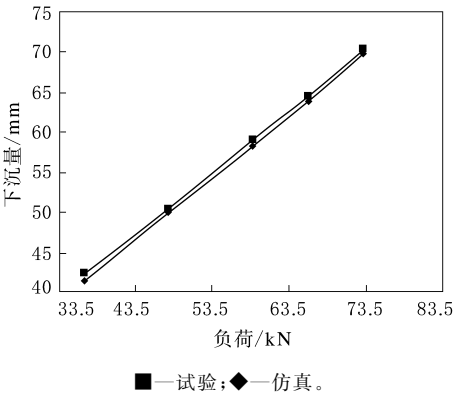


图4 有限元仿真与试验结果对比

从图4可以看出,与试验结果相比,有限元仿真的误差非常小,说明本研究所建立的有限元模型是合理的。

1.2 子模型

1.2.1 子模型技术

对一个模型进行分析时,完整的模型称为全局模型,子模型则是从全局模型切下来的一部分^[3]。

子模型方法是将整个问题分为两步,分别利用两个计算模型进行求解。首先用较粗的网格对全局模型进行计算;然后将局部区域从全局模型中切割出来,再建立一个仅包含局部区域的细分有限元网格模型,并单独对该局部细分模型进行求解;两者的联系是局部区域从整体区域分割出来的分割面,子模型在分割面上的边界条件依赖整体结构的分析结果,即全局模型在子模型边界上的位移结果作为边界条件引入子模型。如果全局模型和子模型在子模型边界上的节点分布不同,Abaqus 会对全局模型在此处的位移结果进行插值处理。

子模型分析依赖于整体计算结果,最适用的情况是全局模型能为分割面提供足够精确的位移(或应力)边界条件,要求分割面满足两个条件:①位于应力或应变梯度较小的位置;②全局模型的计算结果已足够精确,即该位置的计算结果不再受结构中拟建子模型部位网格进一步细化的影响,否则子模型可能会出现数值奇异性问题。结合轮胎的实际结构,子模型技术适用于胎冠部位(分割面选在胎侧部位)分析^[2]。

1.2.2 子模型的建立

根据子模型技术中分割面要满足的两个条件,本研究最终确定采用图 5 所示的胎冠部位对称模型。将其沿轴线对称旋转后与复杂花纹组合在一起生成接地区的子模型(以 180°子午面为中心),如图 6 所示。

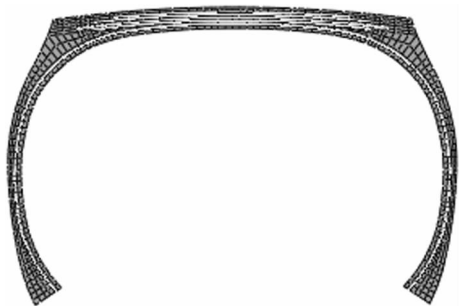


图 5 胎冠部位对称模型

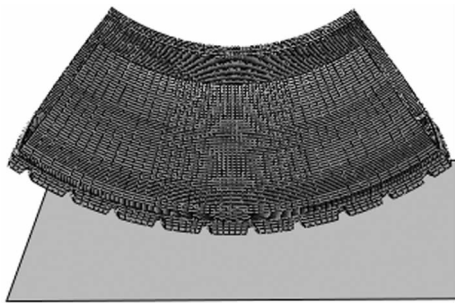


图 6 子模型

子模型不仅在子午面内进行网格细化,在周向也进行细化,子模型在接地中心区域周向角度为 0.9°,其他区域为 1.8°。最终三维模型包含单元 72 166 个,其中精细的胎圈部位含 64 736 个单元,而全局模型对应区域包含的单元数为 3 620,局部网格大大加密。

1.2.3 模型验证

子模型的验证采用受驱动节点考评法。将全

局模型中与精细子模型所占区域相同的部分分割出来,以此部分作为一个网格较粗的子模型。如果采用的静态子模型方法是有效的,则可以预期粗子模型计算得到的结果应该与全局模型得到的结果基本一致,因为粗子模型的网格与全局模型完全一致。

在 Abaqus/Standard 中对粗子模型进行充气 and 静负荷状态模拟,选取胎体帘线在 180°子午面内的若干点作为节点集合,比较整体模型与粗子模型中该节点集合的计算结果。结果表明,二者的计算结果吻合良好,证明所建子模型是合理和有效的。

2 数值模拟

2.1 静负荷工况下的应力应变

为了获得局部区域更精确的结果,采用子模型技术对胎冠部位进行精细网格有限元分析。与静负荷和滚动状态相比,充气状态下胎冠部位橡胶结构的应力和应变均很小,因此胎冠部位橡胶结构分析应该重点考察静负荷和滚动工况。

以垂直于轮胎中分面且通过轮胎中心的面为起始面,沿顺时针方向,与所取截面构成的角为 θ ,如图 7 所示。

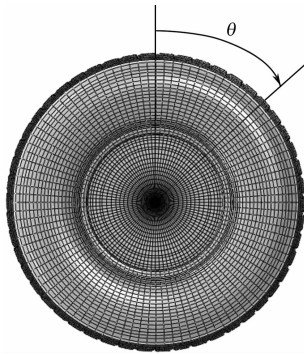


图 7 θ 角示意

$\theta=180^\circ$ 截面内胎冠部位橡胶结构额定静负荷工况(标准充气压力 0.84 MPa、额定负荷 30 kN)下的 Mises 应力、应变分布分别如图 8 和 9 所示。

由图 8 可以看出,在该截面内,Mises 应力分布关于中分面完全对称,在带束层帘线端部出现应力集中情况。

由图 9 可以看出,剪切应变分量的分布规律

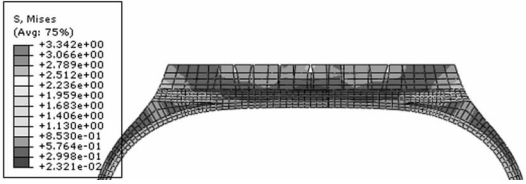
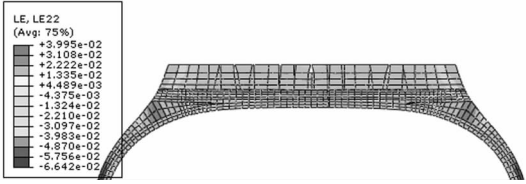
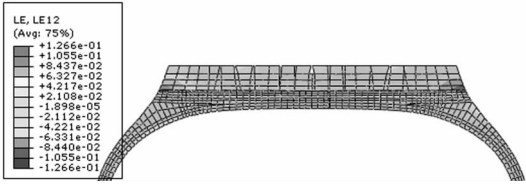


图8 胎冠部位橡胶结构的 Mises 应力分布



(a)正应变(LE22)



(b)剪切应变(LE12)

图9 胎冠部位橡胶结构的应变分布

与 Mises 应力不完全一致。该截面内正应变 (LE22)分布关于中分面完全对称,剪切应变 (LE12)关于中分面大小对称,方向相反。

由于胎冠部位的胎体帘线 and 多层带束层等骨架结构的相互作用,加上轮胎内充气作用及胎面与地面的接触作用,因此在橡胶结构中产生了复杂的变形,尤其在带束层端部往往存在严重的应力集中和较大的剪切变形。

2.2 胎冠部位危险区域的分布

根据 Mises 应力和剪切应变分量的分布情况,提取出胎冠部位橡胶结构中的 5 个相对危险区域,如图 10 所示。

由图 10 可以看出,区域 K 位于花纹沟顶部,在与地面接触的过程中易产生应力集中;区域 M 位于第1带束层端部且与胎肩部位交界处,此处

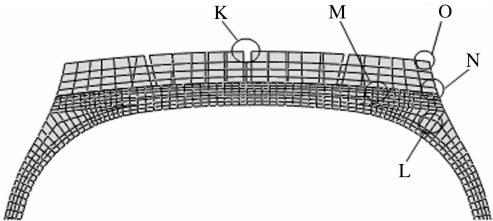


图10 胎冠部位橡胶结构中的危险区域

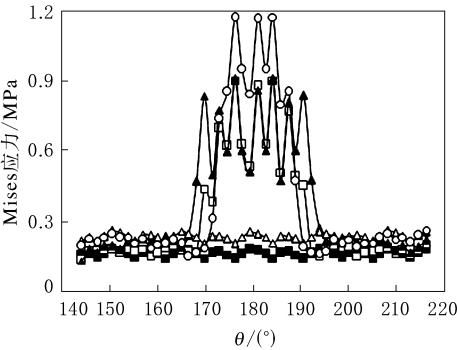
材料及结构均存在突变,其应力集中和剪切变形在整个胎冠部位是最严重的,这可能导致带束层层间破坏;区域 L 为胎肩部位靠胎侧处,该部位应力不高,但正应变很大,可能使胎肩与胎侧脱离,最终导致轮胎破坏;区域 N 位于胎冠部位与花纹交界处,该部位两侧的剪切应变方向相反,会引起严重的剪切变形,应力也较大;区域 O 位于花纹边缘,该位置由于受接地的影响,剪切应变较大。

2.3 不同工况各危险区域的应力比较和分析

在 $\theta=144^{\circ}\sim 216^{\circ}$ 的区域研究静负荷工况下接地以及超载对胎冠部位危险区域受力的影响。具体包括以下 5 种工况:标准充气压力 (0.84 MPa)、额定静负荷 (标准充气压力、额定负荷 30 kN)、标准充气压力与 150% 加载 (45 kN)、150% 充气压力 (1.26 MPa)、150% 充气压力与额定加载,分别记为工况 1~5。图 11~15 所示为胎冠部位橡胶结构中危险区域节点沿周向的 Mises 应力分布曲线。

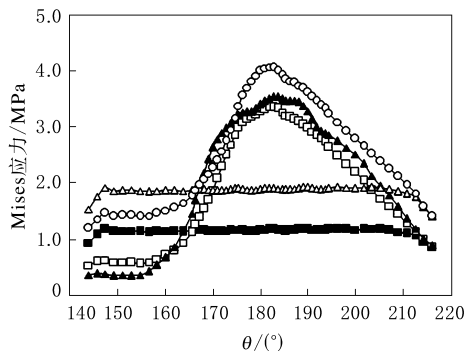
由图 11~15 可以看出,胎冠部位的几个危险区域的受力分布极不均匀,在接地中心附近的范围内加载状态下的 Mises 应力陡然增大,增幅是充气状态下的几倍。

通过对比危险区域内 150% 充气工况与其余 3 种含静载的工况可以发现,加载对接地中心附近胎冠部位危险区域受力的影响明显大于充气压力改变的影响;除 M 区域外,其余危险区域受力状况基本关于 $\theta=180^{\circ}$ 子午面对称,这与带束层交错铺设有关。接地区的应力明显高于非接地区;每条曲线都不是光滑的,出现周期性的峰谷,K 区



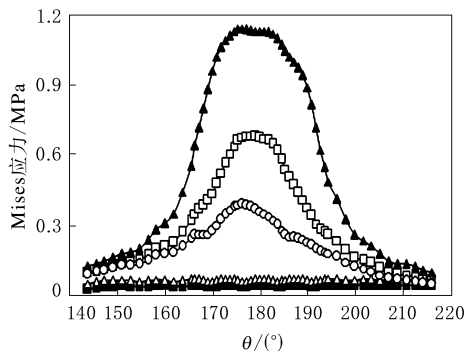
■—工况 1;□—工况 2;▲—工况 3;△—工况 4;○—工况 5。

图11 区域 K 内 Mises 应力沿周向的分布



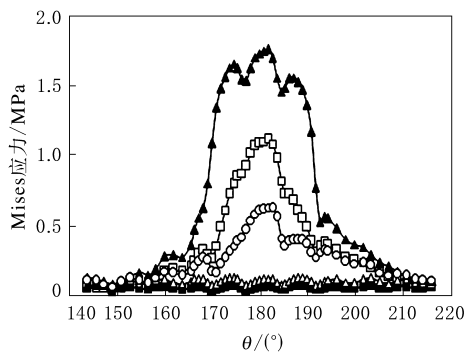
注同图 11。

图 12 区域 M 内 Mises 应力沿周向的分布



注同图 11。

图 13 区域 L 内 Mises 应力沿周向的分布

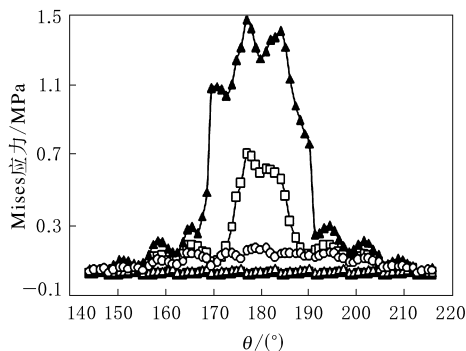


注同图 11。

图 14 区域 N 内 Mises 应力沿周向的分布

域格外明显。经过测量波峰和波谷的距离发现,曲线抖动的周期与花纹节距的变化一致,可推断胎冠部位危险区域的受力不仅与接地有关,还与花纹的形状有关,从该侧面也能反映出花纹形状对轮胎力学特性的重要性。

在接地区,不同工况对危险区域的影响不同。例如,K 和 M 区域受力由大到小的工况顺序依次为:工况 5>工况 3>工况 2>工况 4>工况 1,而



注同图 11。

图 15 区域 O 内 Mises 应力沿周向的分布

另 3 个区域依次为:工况 3>工况 2>工况 5>工况 4>工况 1。接地区内,在充气压力一定的情况下,静载越大,危险区域受力越大;对于 K 和 M 区域,在静载一定的情况下,充气压力越大,受力越大;对于 L, N 和 O 区域,在静载一定的情况下,充气压力越大,受力越小,而胎体帘线的受力应该显著上升。这说明轮胎在实际使用中应选择合适的充气压力,充气压力增大对各个不同区域的影响是不同的,选择较高的充气压力可能对人们关心的轮胎危险区域会更有利。

在充气工况下,危险区域受力分布较均匀,充气压力的提高会使危险区域受力增大,但曲线分布规律基本不变,类似将标准充气工况下的曲线整体向上平移,充气压力变化对各区域的影响也不同,如 L, N 和 O 区域受力增大的幅度明显小于其他 2 个区域。

3 结论及改进方法

子午线轮胎的带束层端部(区域 M)在使用中是最容易破坏的位置,由于材料及结构均存在突变,其应力集中和剪切变形在整个胎冠部位是最严重的,因此有必要改善该部位的应力集中状况。本研究采用提高胎肩部位弹性模量的方法来减缓该部位材料的变化,进而降低应力集中。将胎肩部位弹性模量提高到与带束层部位相同(其他条件不变),在超载工况(工况 3)下计算区域 M 沿周向的 Mises 应力分布情况,并与原设计方案进行对比,如图 16 所示。

由图 16 可以看出,仅增大胎肩部位的弹性模量就可以明显减小带束层端部的应力集中,说明

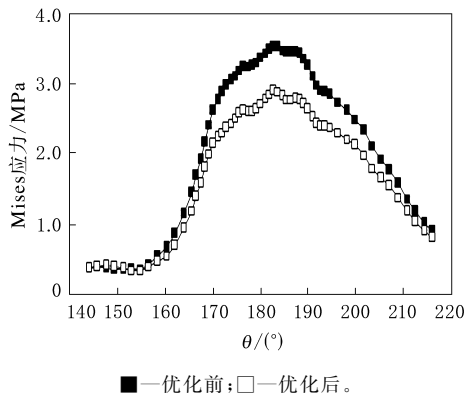


图 16 优化前后带束层端部在超载情况下的 Mises 应力对比

优化后的方案更合理。

4 结语

基于组合模型技术和子模型技术建立轮胎有限元模型,并分析其危险区域的受力情况,对优化轮胎设计、提高轮胎性能是行之有效的。

参考文献:

- [1] 戚顺青,马永禄,张宝亮.全钢载重子午线轮胎胎冠高度变化的静态受力分析[J].轮胎工业,2010,30(11):657-660.
- [2] 李兵.计及复杂胎面花纹的子午线轮胎结构有限元分析[D].合肥:中国科学技术大学,2008.
- [3] 石亦平,周玉蓉.ABAQUS有限元实例详解[M].北京:机械工业出版社,2006.

收稿日期:2015-01-16

Numerical Simulation on Rubber Structure in Crown of Radial Tire

HU Shan-feng, SHU Yong-ping

(Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: For 12.00R20 truck radial tire, the global model with complex pattern based on combined model technology and the submodel with fine grid in the crown based on submodel technique were established and verified. The stress and strain characteristics of the rubber structure in the tire crown under static load condition were simulated accurately by using submodel, and the stress of five weak areas in the crown was analyzed. The results showed that, the end of the belt (area M) was most vulnerable to be damaged, and because of the transition of material and structure, its stress concentration and the shear deformation were most serious in the whole crown area. Then the improved method was put forward based on the simulated results.

Key words: radial tire; crown; rubber structure; numerical simulation

轮胎生产企业废水处理用净水剂及 废水处理方法

中图分类号:TQ336.1;X783.3 文献标志码:D

由山东永泰化工有限公司申请的专利(公开号 CN 104478169A, 公开日期 2015-04-01)“轮胎生产企业废水处理用净水剂及废水处理方法”,涉及一种轮胎生产企业废水处理用净水剂及采用该净水剂处理轮胎生产企业废水的方法。该净水剂包含无机净水剂、微生物净水剂和酶制剂,无机净水剂配方(份)为聚合氯化铝 5~20、聚丙烯酰胺 4~16、硫酸亚铁 2~15、硫酸铝 5~

16、微生物净水剂配方(份)为硝化细菌菌粉 0.5~2、脱氮副球菌菌粉 0.4~1.4、硫细菌菌粉 0.2~0.8、苯胺降解菌菌粉 0.3~1.2、酶制剂配方(份)为果胶酶 0.1~1.5、纤维素酶 0.4~1.5、脱氢酶 0.1~0.8、氧化还原酶 0.2~0.8、木聚糖酶 0.1~0.6。该废水处理用净水剂用具有吸附能力的材料为原料,辅以微生物对废水进行处理,使用范围广,并具有净水效果好,净水速度快、安全性高,不产生二次污染的优点,处理后的水透明度极高,可回收利用。

(本刊编辑部 马 晓)