

全钢子午线轮胎疲劳破坏现象仿真与优化设计研究

熊春明¹, 臧孟炎¹, 周涛², 晏宁²

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640; 2. 广州丰力橡胶轮胎有限公司, 广东 广州 511400)

摘要:基于有限元的轮胎疲劳寿命评价方法,建立295/80R22.5全钢子午线轮胎的有限元模型。使用ABAQUS隐式分析方法获得轮胎的应变、应力以及应变能密度等基本参数后,根据轮胎实际使用中的破坏情况选择影响疲劳寿命的评价指标。结果表明:高速耐久工况下,应选择应变能密度和帘线张力作为影响疲劳寿命的评价指标,而且适当增加带束胶厚度能有效提高轮胎的疲劳寿命;低速重载工况下,应当选择帘线和橡胶间的剪应力(层间剪应力)作为影响疲劳寿命的评价指标,且适当降低胎体帘布层和补强层的高度能有效提高轮胎的疲劳寿命。

关键词:全钢子午线轮胎;疲劳破坏;有限元分析

中图分类号:U463.341⁺.3/.6;O241.82 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-8171(2016)09-0515-05

轮胎是汽车上唯一与地面直接接触的部件,对车辆的操纵稳定性、制动性、动力性、燃油经济性及舒适性都有重要影响。轮胎的主要失效方式是疲劳失效。疲劳失效是指轮胎受到载荷作用发生交变变形时,应力应变不同步,产生永久变形,使分子链缓慢破坏而产生的失效^[1]。全钢子午线轮胎疲劳破坏形式主要有两种:带束层端点脱层和胎体帘布反包端点脱层^[2]。目前轮胎疲劳寿命研究多集中在胎肩位置,而对胎圈破坏问题很少涉及。

本研究建立了295/80R22.5全钢子午线轮胎的有限元模型,使用ABAQUS软件的隐式计算方法获得轮胎在高速耐久工况和低速重载工况下的应变、应力以及应变能密度等数据。然后,根据轮胎实际使用时的疲劳破坏情况,针对高速耐久和低速重载两种工况分别选择影响轮胎疲劳寿命的合理评价指标。

1 轮胎破坏情况

全钢子午线轮胎多用于重型货车。在高速耐久工况下,全钢子午线轮胎的疲劳破坏多发生在带束层端部,而在低速重载工况下多发生在胎体帘布层端部,如图1所示。但无论如何,破坏位置都在钢丝与橡胶的过渡区域。

作者简介:熊春明(1992—),男,重庆人,华南理工大学在读硕士研究生,主要从事汽车CAE方向的研究。



(a) 高速耐久工况下的带束层端点破坏



(b) 低速重载工况下的胎体帘布层端部破坏

图1 轮胎破坏截面

下面将建立轮胎有限元模型,分别对高速耐久和低速重载两种典型工况进行分析,根据仿真分析结果和疲劳破坏发生情况,提出全钢子午线轮胎不同工况下影响疲劳寿命的评价指标。

2 模型建立

在建立轮胎三维有限元模型之前,对轮胎二维截面进行网格划分,然后使用ABAQUS建立三维有限元模型。考虑到建模效率、求解收敛性以及计算效率问题,对轮胎进行如下简化:(1)仅考

虑纵向花纹,忽略横向花纹;(2)简化胎肩部位外轮廓形状,如忽略防擦线、规格标识、磨损指示标记等突起和凹陷的外形轮廓;(3)轮辋和路面均采用刚体材料;(4)轮胎几何结构视为轴对称。

由于橡胶材料的非线性以及轮胎运动变形属于大变形行为,采用Yeoh模型的超弹性材料模拟橡胶^[3]。对于帘线-橡胶复合材料,通常有两种方案来进行模拟,一种是采用各向异性材料模型模拟帘线-橡胶复合材料;另一种是用各向同性材料模型模拟橡胶材料,用rebar单元模拟帘线材料。为了更好地输出帘线力和网格划分的便利性,本研究采用第2种方法^[4-5]。

轮胎实际运动过程中,会同时与轮辋以及地面产生接触。为了提高模拟精度和计算收敛性,对轮辋与胎圈处的接触以及胎面与地面间的接触,设置接触类型为面面接触,法向接触行为定义为硬接触,切向接触行为采用ABAQUS默认的罚函数摩擦公式进行定义^[6]。轮辋和胎圈间的摩擦因数设为0.21。稳态滚动分析步中,胎面与地面间摩擦因数设为0.8。

采用稳态传输方法对轮胎的滚动和移动进行模拟,即轮胎模型的网格不转动但材料沿着轮胎周向以给定的速度流动,同时给轮胎模型一个移动速度。

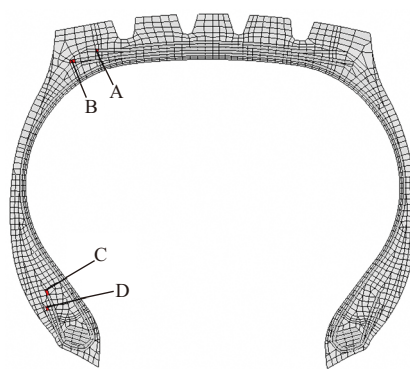
以全钢子午线轮胎295/80R22.5为研究对象,轮胎有限元网格如图2所示。

实施轮胎径向刚度有限元仿真和试验,结果如图3所示。从图3可以看出仿真曲线和试验结果变化趋势一致,其斜率也很接近,验证了有限元模型建立的正确性。

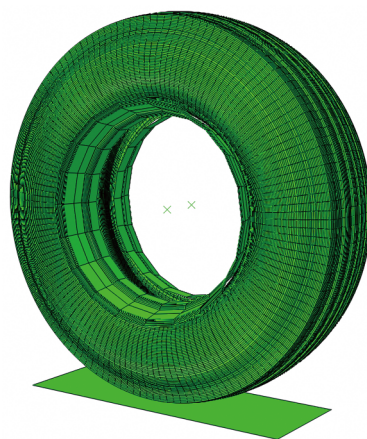
3 疲劳寿命评价指标

不同工况下,轮胎各部分受力情况差别很大,用同样的指标评价高速耐久和低速重载两种不同工况下轮胎的疲劳寿命是不合理的。

轮胎疲劳寿命常用的评价指标有正应力、剪应力、正应变、剪应变、应变能密度、帘线张力等。本工作从仿真分析结果中提取应变能密度、帘线张力以及帘线与橡胶间的剪应力,结合轮胎在不同工况下的破坏位置,选择合理的评价指标进行疲劳寿命评价。



(a) 二维模型



(b) 三维模型

图2 轮胎有限元模型

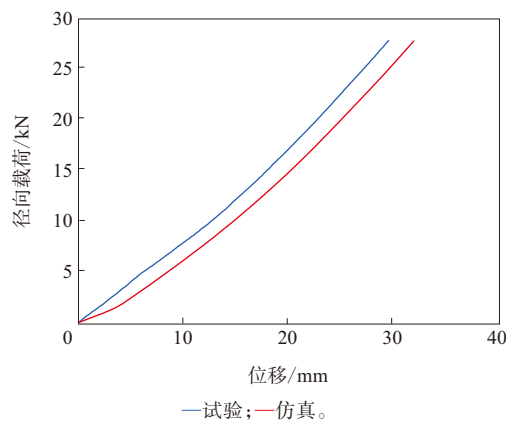


图3 径向刚度特性曲线

3.1 高速耐久工况

高速耐久工况下,定义速度为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,充气压力为0.85 MPa,垂向载荷为27.83 kN。轮胎接地中心横截面的应变分布如图4所示。由图4可知,在2#,3#带束层端部、胎体帘布层端部以及补强层端部有明显的应变集中。

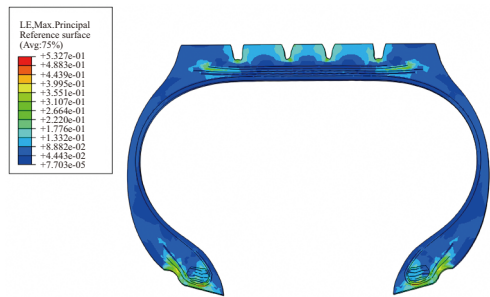


图4 高速耐久工况轮胎接地中心横截面应变云图

2[#],3[#]带束层端部、胎体帘布层端部以及补强层端部的应变能密度、帘线张力及层间剪应力归纳如表1所示。表1中的“最大值”是该指标在A,B,C,D[见图2(a)]四个单元中任一单元,轮胎转动一周过程中的最大值;“变化幅度”是该指标在A,B,C,D四个单元中任一单元,轮胎转动一周过程中的最大值与最小值之差。

实际使用的破坏情况显示,高速耐久工况下

最容易发生疲劳破坏的位置在3[#]带束层端部。由表1可以看出,原模型中,应变能密度的最大值和变化幅度及帘线张力的最大值和变化幅度都是3[#]带束层端部单元最大;而层间剪应力的最大值发生在2[#]带束层端部,层间剪应力的最大变化幅度发生在胎体帘布层端部。基于以上分析,选择应变能密度和帘线张力作为高速耐久工况下的疲劳评价指标比较合适。

在原模型[见图2(a)]的基础上增加2[#]与3[#]带束层之间胶的厚度,并建立修改带束层有限元模型。由仿真结果得知:3[#]带束层端部单元的应变能密度最大值和变化幅度分别为0.39和0.35 J·mm⁻³,相对原模型的0.46和0.39 J·mm⁻³有明显降低;3[#]带束层端部单元的帘线张力最大值也由54.9 N降为53.4 N。由此可知,适当增加2[#]与3[#]带束层之间胶的厚度可有效提高轮胎的疲劳

表1 高速耐久工况下295/80R22.5原模型与修改带束层模型数据对比

模型部位	应变能密度/(J·mm ⁻³)		帘线张力/MPa		层间剪应力/MPa	
	最大值	变化幅度	最大值	变化幅度	最大值	变化幅度
3 [#] 带束层端部						
原模型	4.58E-01	3.85E-01	5.49E+01	3.75E+01	1.21E-01	1.74E-02
修改带束层	3.88E-01	3.50E-01	5.34E+01	4.03E+01	1.43E-01	1.26E-01
2 [#] 带束层端部						
原模型	2.20E-02	2.00E-01	2.62E+01	2.56E+01	-1.89E-01	1.84E-01
修改带束层	2.80E-02	2.60E-02	3.30E+01	3.19E+01	-1.80E-01	1.78E-01
胎体帘布层端部						
原模型	8.70E-03	4.60E-03	3.11E+01	1.68E+01	1.37E-01	2.23E-01
修改带束层	8.95E-03	4.93E-03	3.09E+01	1.71E+01	1.48E-01	2.28E-01
补强层端部						
原模型	1.61E-01	1.21E-01	8.98E+00	1.64E+01	1.35E-01	6.70E-02
修改带束层	1.69E-01	1.28E-01	9.39E+00	1.65E+01	1.39E-01	6.90E-02

寿命。

3.2 低速重载工况

低速重载工况下,定义速度为30 km·h⁻¹,充气压力为0.64 MPa,垂向载荷为69.58 kN。低速重载工况下接地区域轮胎截面的应变云图如图5所示。由图5可知,重载工况下的应变云图跟高速耐久工况的应变云图有明显区别。虽然2[#],3[#]带束层端部、胎体以及补强层端部仍然是应变集中区,但胎体及补强层端部应变集中程度明显大于2[#],3[#]带束层端部。

提取2[#],3[#]带束层端部、胎体帘布层端部和补强层端部的应变能密度、帘线张力以及层间剪应

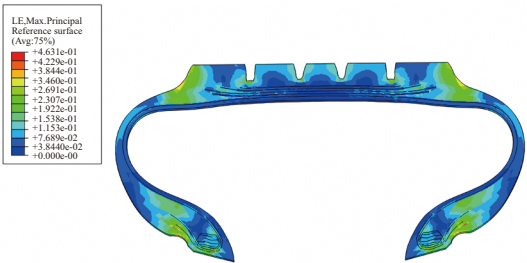


图5 低速重载工况轮胎接地中心横截面应变云图

力,如表2所示。由表2可知,原模型中,胎体帘布层端部的层间剪应力最大值和变化幅度显著高于其他部位,而且实际使用中的破坏情况显示,低速重载工况下最容易发生疲劳破坏的位置是胎体帘

表2 低速重载工况下295/80R22.5原模型与修改胎圈模型数据对比

模型部位	应变能密度/(J·mm ⁻³)		帘线张力/MPa		层间剪应力/MPa	
	最大值	变化幅度	最大值	变化幅度	最大值	变化幅度
3 [#] 带束层端部						
原模型	1.28E-01	1.28E-01	3.47E+01	3.99E+01	1.25E-01	1.58E-01
修改胎圈	1.29E-01	1.28E-01	3.49E+01	3.99E+01	1.26E-01	1.59E-01
2 [#] 带束层端部						
原模型	4.47E-02	4.42E-02	3.24E+01	4.63E+01	-1.89E-01	2.49E-01
修改胎圈	4.47E-02	4.42E-02	3.26E+01	4.63E+01	-1.89E-01	2.48E-01
胎体帘布层端部						
原模型	8.17E-02	6.70E-02	2.75E+01	2.64E+01	4.02E-01	7.72E-01
修改胎圈	9.49E-02	6.48E-02	3.39E+01	2.49E+01	3.63E-01	6.83E-01
补强层端部						
原模型	3.94E-01	3.82E-01	-2.49E+01	4.75E+01	1.42E-01	1.14E-01
修改胎圈	2.25E-01	1.76E-01	2.58E+01	4.39E+01	1.06E-01	6.46E-01

布层端部。因此低速耐久工况下应选择层间剪应力作为疲劳寿命评价指标。

在原模型的基础上降低胎圈处胎体帘布层和补强层端部的高度,并建立修改胎圈有限元模型。仿真结果表明,胎体帘布层端部层间剪应力最大值和变化幅度分别由0.40和0.77 MPa降为0.36和0.68 MPa,相对原模型有明显降低。由此得出结论,适当降低胎体及补强层端部高度可有效提高轮胎疲劳寿命。

4 结语

通过有限元分析计算结果,结合轮胎实际破坏情况,选择轮胎在不同工况下的疲劳寿命评价指标。研究表明,高速耐久工况选用应变能密度和帘线张力而低速重载工况选用层间剪应力评价轮胎疲劳寿命具有更好的针对性。而且适当增加带束层胶厚度的修改带束层模型在高速耐久工况下能有效提高疲劳寿命;适当降低胎体和补强层端部高度的修改胎圈模型在低速重载工况下可以有效延长疲劳寿命。本研究成果可为轮胎疲

劳寿命的优化设计提供有效参考。

轮胎实际滚动过程中会由于橡胶材料的迟滞损失而产生大量的热,而橡胶材料性能受温度影响很大,因此,下一步将在目前工作的基础上考虑生热影响,并进行轮胎疲劳寿命的量化研究,使分析结果更具有实际工程意义。

参考文献:

[1] 何志刚,周孔亢,应世洲,等. 轮胎疲劳失效研究综述[J]. 机械工程学报,2009,45(3):76-83.

[2] 程钢,赵国群,管延锦. 滚动轮胎耐久性有限元分析[J]. 弹性体,2006,16(1):20-25.

[3] 黄建龙,解广娟,刘正伟. 基于Mooney-Rivlin模型和Yeoh模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡胶工业,2008,55(8):467-471.

[4] Meschke G. 3D Simulations of Automobile Tires:Material Modeling, Mesh Generation, and Solution Strategies[J]. Tire Science and Technology, 1997,25(3):154-176.

[5] 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.

[6] 庄茁,张帆,岑松,等. ABAQUS非线性有限元分析与实例[M]. 北京:科学出版社,2005:312-322.

收稿日期:2016-03-14

Simulation Analysis of Fatigue Failure of All-steel Radial Tire and Structure Optimization

XIONG Chunming¹, ZANG Mengyan¹, ZHOU Tao², YAN Ning²

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou Fengli Tire & Rubber Co., Ltd, Guangzhou 511400, China)

Abstract: On the basis of tire fatigue life evaluation method, the finite element model of all-steel

radial tire 295/80R22.5 was built. Parameters like strain, stress and strain energy density were obtained using ABAQUS implicit algorithm, and the tire fatigue life evaluation parameters were identified based on actual failure modes. The results indicated that, under long-lasting and high speed condition, the strain energy density and rebar tension force should be chosen as the tire fatigue life evaluation parameters, and appropriately increasing the thickness of the composite between 2[#] belt and 3[#] belt could lengthen the fatigue life effectively. Under the condition of overload and low speed, the shear stress between the cord and rubber compound should be chosen as the tire fatigue life evaluation parameter, and appropriately reducing the height of the carcass layers and reinforcement layers could lengthen the fatigue life effectively.

Key words: all-steel radial tire; fatigue failure; finite element analysis

Nitto推出Ridge Grappler轻载轮胎

中图分类号:TQ336.1 文献标志码:D

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntiredealer.com)2016年6月7日报道:

Nitto轮胎美国公司轻载轮胎Grappler系列新增了Ridge Grappler轮胎(如图1所示)。Ridge Grappler轮胎介于Nitto Trail Grappler泥地轮胎与Nitto Terra Grappler G2全地形轮胎之间,将提供30种规格。



图1 Ridge Grappler轮胎

Nitto公司称,Ridge Grappler轮胎采用多项新技术,使其越野能力与舒适、安静全地形之间达到完美平衡。

Ridge Grappler胎面为与众不同的动态混合型花纹。为尽量减少大多数胎面设计在高速公路行驶时的固有杂声,Ridge Grappler轮胎具有降噪变节距胎面花纹块。在越野地况,交替胎肩沟槽有助于快速清除淤泥而横向曲折沟槽提供更大的牵引力。其增强的花纹基部可提高刚性以减少胎面弯曲。

Ridge Grappler轮胎还可提供F负荷级别规格,

与E负荷级别相比,可在高充气压力下具有更高承载能力。

“Ridge Grappler轮胎为我们的载重汽车客户提供越野性能与日常驾乘舒适性的完美平衡,”高级工程师Alan Ngo说,“Ridge Grappler拥有激动人心的新技术,使其成为我们有史以来可提供最强大能力和价值的产品。”

Ridge Grappler将提供30种规格,包括Jeep Wranglers的原配胎以及0.75和1 t的载重汽车轮胎,拥有两种独特的胎侧设计,可使司机选择最适合他们车辆外观的轮胎。

Ridge Grappler轮胎于2016年7月推出的规格包括:LT285/70R17 C 116/113Q, LT285/70R17 E 121/118Q, 37×12.50R17LT D 124Q, 37×12.50R20LT E 126Q和35×12.50R22LT F 121Q。后续推出的规格包括:LT265/70R17 E 121/118Q, LT275/65R20 E 126/123Q, LT285/75R17 C 117/114Q, LT295/55R20 E 123/120Q, LT285/75R17 E 121/118Q, LT295/60R20 E 126/123Q, LT295/70R17 E 121/118Q, LT295/65R20 E 129/126Q, LT305/70R17 E 121/118Q, LT305/55R20 F 125/122Q, 33×12.50R17LT E 120Q, 33×12.50R20LT F 119Q, 35×12.50R17LT E 121Q, 35×11.50R20LT E 124Q, LT275/65R18 E 123/120Q, 35×12.50R20LT F 125Q, LT275/70R18 E 125/122Q和35×13.50R20LT F 126Q。

(吴淑华摘译 李静萍校)