

交错结构免充气安全轮胎的静态接地性能和疲劳寿命的有限元分析与预测

张天华¹, 许 喆^{2*}, 王 伟^{1,3*}

(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. 国家知识产权局专利局专利审查协作北京中心, 北京 100160; 3. 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:提出一种交错结构免充气安全轮胎,借助有限元分析软件Abaqus对其静态接地性能进行分析,并采用德莫西亚疲劳试验获得轮胎支撑体聚氨酯材料的应力(S)-疲劳寿命(N)曲线,将其输入疲劳分析软件FE-SAFE预测轮胎的疲劳寿命。结果表明,交错结构免充气轮胎的静刚度曲线与同规格充气子午线轮胎基本吻合,接地面积和平均接地压力接近,说明其达到了同规格充气子午线轮胎的使用性能,且疲劳寿命相近。

关键词:免充气轮胎;子午线轮胎;交错结构;聚氨酯支撑体;疲劳寿命;有限元分析

中图分类号:TQ336.1;O242.82 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2018)00-0000-04

目前,安全轮胎的种类很多,根据不同条件的特殊性能要求,主要分为充气型安全轮胎和免充气型安全轮胎两类^[1-3]。通过比较发现,充气型安全轮胎主要借助在轮胎气腔内部填充特殊粘性材料或刚性支撑体,当轮胎出现破坏时,其可起临时补救作用避免因轮胎突然失压而造成严重的交通事故。这类安全轮胎普遍存在质量大、续航里程短、行驶稳定性和散热性差的缺点。因此,轮胎研究者提出免充气安全轮胎的概念。免充气安全轮胎摆脱传统充气轮胎的限定,主要依靠非充气实体结构支撑轮胎滚动^[4-5]。在多种类型的免充气安全轮胎中,聚氨酯(PU)轮胎性能比较优异,加工工艺相对简单,胎面磨损后可更换,易于翻新,符合节能环保的发展趋势。最具代表性的是2005年米其林公司发布的TWEEL免充气安全轮胎。

本工作提出一种交错结构的免充气安全轮胎,借助有限元分析软件Abaqus对其静态接地性能进行分析,并采用德莫西亚疲劳试验获得轮胎支撑体材料的应力(S)-疲劳寿命(N)曲线,以预测

轮胎的疲劳寿命。

1 免充气安全轮胎的结构设计

1.1 轮胎有限元模型的建立

本交错结构免充气轮胎的设计灵感来源于普利司通第2代免充气概念轮胎和优科豪马的Youmyaku新型免充气概念轮胎。

免充气轮胎的结构设计参考王伟等^[6-9]的设计方法,以11.00R20规格充气子午线轮胎为参考,通过有限元分析软件Abaqus建立免充气安全轮胎三维有限元模型,如图1所示。

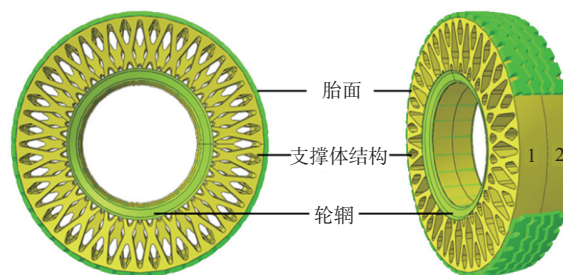


图1 免充气安全轮胎结构示意图

该轮胎主要由胎面、支撑体结构和轮辋三部分组成。以新型高分子材料作为辐板或网面支撑体结构材料。在行驶过程中,胎面将受力传递给支撑体,从而达到与充气轮胎相同的承载能力和减震效果。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21274072, 51273099);绿色轮胎与橡胶协同创新中心开放基金资助项目(2014GTR0005)

作者简介:张天华(1991—),女,山东青岛人,青岛科技大学硕士研究生,主要从事载重子午线轮胎有限元分析研究。

*通信联系人(xzqd2003@126.com/wdavid1@163.com)

本设计交错结构支撑体免充气轮胎是将完整的支撑体结构平均分成如图1所示的1和2两部分,两部分结构完全相同。将其中一半支撑体1装配好后,将另一半支撑体绕轮胎中心线旋转 7.5° 装配到位置2,形成交错结构的支撑体。

1.2 材料参数

胎面胶的Yeoh本构模型材料参数 C_{10} 、 C_{20} 和 C_{30} 分别为0.658 165, -0.095 070和0.026 315 MPa。另外,支撑体部分采用聚氨酯材料,其参数的选取借鉴前人的处理方法,取应力-应变曲线中应变为50%时的割线斜率为杨氏模量(19 MPa),泊松比为0.45。

1.3 网格单元类型和边界条件

将免充气轮胎各部件装配完整,轮胎内部各部件之间采用Tie固定连接在一起,在轮辋中心施加边界条件,使轮胎固定。所施加载荷为11.00R20充气子午线轮胎的标准载荷34.79 kN。免充气轮胎胎面和支撑体网格划分均采用C3D8H杂交单元类型,路面和轮辋设定为刚体。设定轮胎与路面之间的摩擦因数为0.3。

2 静态接地工况下的轮胎性能分析

免充气轮胎在静载荷下存在两种接地情况,如图2所示,交错结构免充气轮胎在静载荷下的垂直变形从图中的标尺可见,在位置1和位置2(在位置1的基础上,支撑体整体旋转 3.75°)两种不同结构接地时,轮胎的垂直下沉量基本相同,两者之间的差异非常小。

交错结构支撑体免充气轮胎的径向刚度曲线如图3所示。

从图3可以看出,免充气轮胎处于两种不同接地位置时的静刚度曲线基本重合,并且与同规格充气子午线轮胎的实测静刚度曲线吻合良好,表明该结构免充气轮胎行驶稳定性比较好。

对交错结构免充气轮胎在标准载荷(34.79 kN)下的垂直变形、接地面积、平均接地压力和最大接地压力进行分析,并与同规格充气子午线轮胎进行对比,结果如表1所示。

交错结构支撑体免充气轮胎不仅在行驶平稳性方面满足轮胎的正常使用要求,从表1还可以看出,免充气轮胎在静载荷下接地面积和平均接

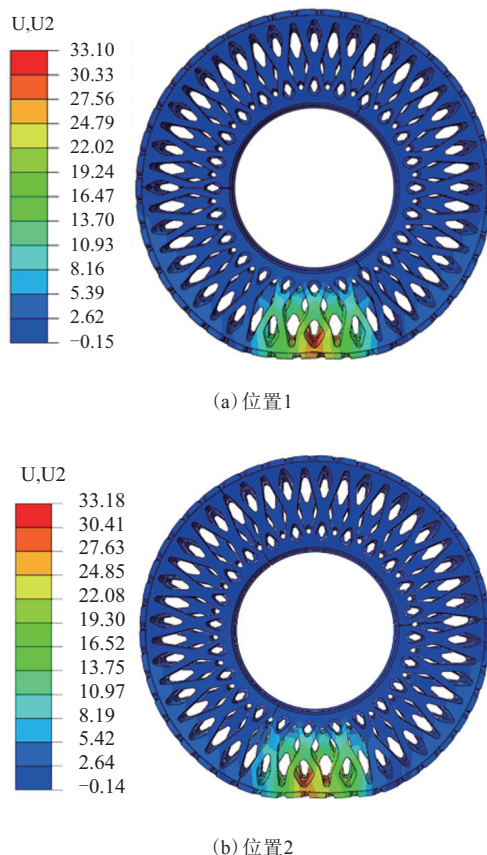
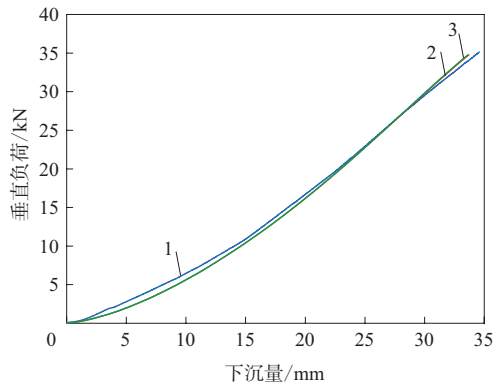


图2 交错结构支撑体免充气轮胎的垂直变形



1—实测(子午线轮胎);2—模拟(位置1);3—模拟(位置2)。

图3 交错结构免充气轮胎与同规格充气子午线轮胎静刚度曲线的比较

地压力与充气轮胎非常接近。从平均接地压力和最大接地压力两组数值来看,免充气轮胎的平均接地压力略高于充气轮胎。虽然平均接地压力的增大会加剧胎面磨损,但免充气轮胎最大接地压力明显小于充气轮胎,说明免充气轮胎的接地压力分布更均匀,可以有效避免胎面由于接地不均

表1 标准工况下交错结构免充气轮胎接地特性模拟值与同规格充气子午线轮胎实测值的比较

项 目	充气轮胎 实测值	免充气轮胎模拟值	
		位置1	位置2
垂直变形/mm	34.30	33.10	33.18
接地面积/mm ²	42 838	41 200	41 094
平均接地压力/MPa	0.812	0.844	0.846
最大接地压力/MPa	5.31	2.98	3.06

匀而造成的局部磨损严重的问题。

3 轮胎疲劳寿命分析

本研究免充气轮胎主要结构包括三部分,在疲劳寿命分析中,仅考虑中间部分聚氨酯支撑体的疲劳寿命,刚体轮辋与胎面暂不考虑在内。在FE-SAFE中进行聚氨酯支撑体的疲劳寿命预测,需要试验获得其 $S-N$ 曲线。为更准确地描述制品的疲劳寿命,使计算结果更精确,通常选用等加速试验法获取 $S-N$ 曲线,但对预置裂口的聚氨酯哑铃型试样在疲劳试验机上进行屈挠疲劳试验时,发现带裂口的试样经过几次拉伸很快就断裂失效。因此,对于聚氨酯材料,预置裂口试样的疲劳寿命不具有参考性,在获取 $S-N$ 曲线时,仅对未加裂口的聚氨酯试样进行疲劳试验,获得的 $S-N$ 曲线如图4所示。

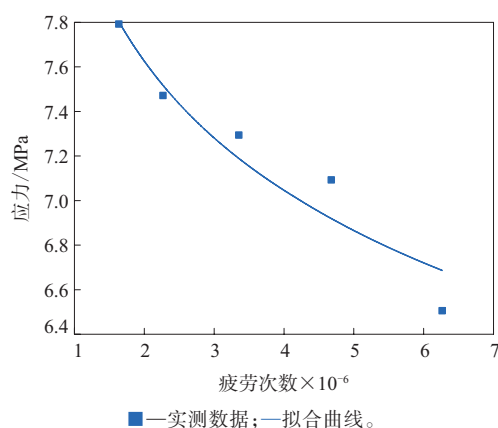


图4 聚氨酯材料的 $S-N$ 曲线

将拟合得到的 $S-N$ 曲线按照FE-SAFE软件要求,导入到“ $S-N$ Curve”材料包中,在分析疲劳寿命时,将其赋予到Material模块中。将在Abaqus中模拟得到的. odb文件应力场结果中最后一个分析步导入到FE-SAFE中,作为疲劳分析的主要应力,载荷倍数设定为1, -1。分析结果如图5所示。

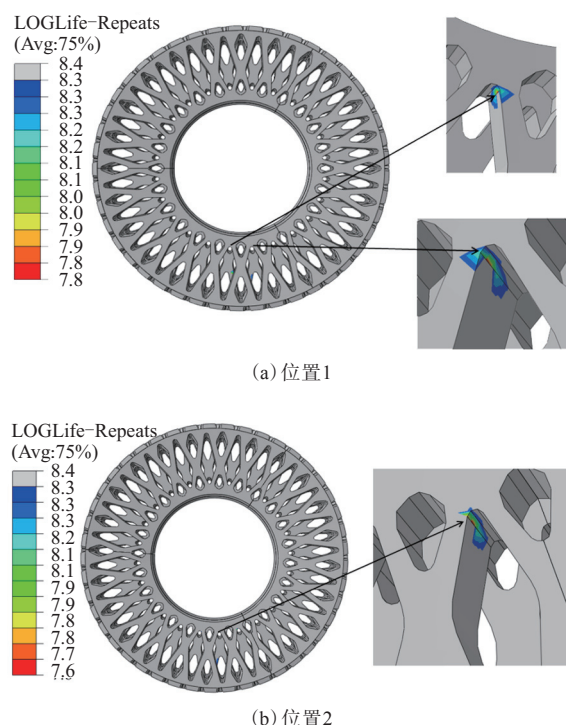


图5 交错结构支撑体轮胎的疲劳寿命分析结果

交错结构支撑体免充气轮胎两个接地位置处的疲劳寿命分别为6 309.6万($10^{7.8}$)和3 981.1万($10^{7.6}$)次。可见,在交错支撑体结构轮胎的滚动过程中,经过大约3 981.1万次滚动后,位置2接地时最先出现疲劳裂纹。从图5中疲劳破坏位置可见,交错结构支撑体轮胎在靠近轮辋的主减震孔顶端圆弧处为薄弱位置,该处最易出现裂纹。

该免充气轮胎的外直径为1 085 mm,位置2处的下沉量为34.04 mm,因此其工作半径为508.46 mm,将滚动次数换算为行驶里程,约为12.7万km。根据赵亚元等^[10-11]对11.00R20充气载重子午线轮胎胎面磨耗性能的分析,可知同规格充气轮胎行驶里程约为11.2万km,实际道路测试结果为10万~14万km。由此表明,当交错结构支撑体轮胎的胎面磨耗达到使用上限时,其支撑体也开始出现疲劳破坏,两者基本同时出现疲劳破坏,从而使胎面和支撑体均得到充分利用,可避免材料浪费。

4 结论

本研究参考11.00R20规格充气子午线轮胎,提出一种交错结构的免充气安全轮胎,借助有限

元软件分析其力学性能,并预测其疲劳寿命,得到如下结论。

(1) 交错结构免充气轮胎基本达到同规格充气子午线轮胎的使用性能要求;

(2) 交错结构支撑体由于减震孔中过渡圆弧的存在,使该处最易出现屈挠疲劳现象,轮胎疲劳破坏行驶里程为12.7万km。

参考文献:

- [1] 曹阳. 安全轮胎系统结构设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [2] 岳红旭, 许靖, 胡国强. 安全轮胎国内外发展现状[J]. 轻型汽车技术, 2011(9): 3-7.
- [3] Jaehyung Ju, Doo-Man Kim, Kwangwon Kim. Flexible Cellular Solid Spokes of a Non-pneumatic Tire[J]. Composite Structures, 2012, 94(8): 2285-2295.
- [4] 徐立. 新型免充气轮胎发展现状[J]. 轮胎工业, 2015, 35(11): 643-653.
- [5] 高晓东, 杨卫民, 张金云, 等. 全塑轮胎浇口设计与联合仿真分析[J]. 橡胶工业, 2018, 65(3): 346-350.
- [6] 王伟, 赵亚元, 黄京城. 一种免充气安全轮胎[P]. 中国: CN 204820967U. 2015-12-02.
- [7] 王伟, 张天华, 孙熙林. 一种免充气轮胎结构[P]. 中国: CN 205951620U. 2017-02-15.
- [8] 黄京城, 王伟. 免充气轮胎与子午线轮胎的有限元分析对比[J]. 橡胶工业, 2016, 63(1): 31-35.
- [9] Jaehyung J, Ananthasayanam B, Summers J D, et al. Design of Cellular Shear Bands of a Non-pneumatic Tire—Investigation of Contact Pressure[J]. Hundred Schools in Arts, 2010, 3(1): 598-606.
- [10] 赵亚元. 子午线轮胎胎面磨耗性能的有限元分析[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2015.
- [11] 赵亚元, 王伟. 载重子午线轮胎胎面磨耗有限元分析[J]. 橡胶工业, 2016, 63(7): 421-424.

收稿日期: 2018-04-25

Finite Element Analysis and Prediction on Static Grounding Performance and Fatigue Life of Staggered Non-pneumatic Tire

ZHANG Tianhua¹, XU Zhe², WANG Wei^{1,3},

(1. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China; 2. Patent Examination Cooperation Center, SIOP, Beijing 100160, China; 3. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A staggered structure non-pneumatic safety tire was proposed, and its static grounding performance was analyzed by finite element analysis software Abaqus. The stress (S)–fatigue life (N) curve of polyurethane support material of the tire was measured by Demencia fatigue test and imported to fatigue analysis software FE-SAFE to predict the fatigue life of the tire. The results showed that, the static stiffness curve of the tire was consistent with the same size pneumatic radial tire, the contact area and average contact pressure was similiar, which indicated that the tire had reached the service performance of the same size pneumatic radial tire, and the fatigue life was similiar.

Key words: non-pneumatic safety tire; radial tire; staggered structure; polyurethane supportor; fatigue life; finite element analysis