

免充气轮胎与子午线轮胎的有限元分析对比

黄京城¹, 王伟^{1,2*}

(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. 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:采用Abaqus软件建立特殊结构的免充气轮胎三维有限元模型, 对其静态加载和侧倾工况进行模拟, 并将计算结果与同规格11.00R20载重子午线轮胎的实测数据进行对比分析。结果表明: 静负荷工况下, 两者的静刚度曲线基本吻合, 下沉量和接地面积接近, 免充气轮胎最大接地压力较小; 侧倾工况下, 两者的接地面积和静刚度曲线的变化趋势接近。免充气轮胎可以达到同规格子午线轮胎的性能要求。

关键词:免充气轮胎; 子午线轮胎; 接地分析; 有限元模拟

中图分类号: TQ336.1; O241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2016)01-0031-05

轮胎是汽车的关键部件, 支撑整车质量, 传递驱动和制动力矩, 提供缓冲性能, 保证转向稳定。汽车因轮胎漏气爆胎通常会引发严重交通事故, 特别是在高速公路上, 爆胎的影响更大。新型免充气轮胎结构特殊, 不需要充气, 从根本上解决了充气轮胎的爆胎隐患。目前, 美国固铂公司研发的仿生蜂巢结构免充气轮胎已用于特种车辆^[1]。另外, 法国米其林公司已生产Tweel车轮和免充气轮胎^[2-3]; 日本普利司通公司研制出螺旋网状结构的免充气安全轮胎^[4]; 韩国韩泰公司研发出绿色环保i-Flex免充气轮胎^[5]。免充气安全轮胎已经成为一种新的发展趋势。在免充气轮胎方面, 我国也取得了一些研究成果。沈阳三橡轮胎有限责任公司研发的和平牌安全轮胎已应用于红旗轿车、运钞车等特殊车辆^[6]。李莉等^[7]研究了一种辐条板式轮胎, 并且进行了仿真验证。岳红旭等^[8]对一种新型安全轮胎进行了非线性有限元分析。

本研究采用Abaqus软件建立免充气轮胎的有限元模型, 进行静态接地和侧倾工况的模拟分析, 并与同规格的11.00R20载重子午线轮胎做性能对比, 以为开发和应用免充气轮胎提供参考。

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

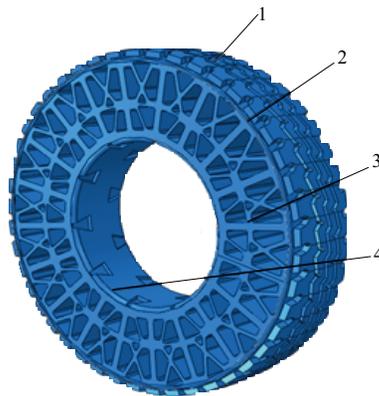
作者简介:黄京城(1989—), 男, 广西桂林人, 青岛科技大学在读硕士研究生, 主要从事载重子午线轮胎有限元分析研究。

*通信联系人

1 新型免充气轮胎的结构特点

新型免充气轮胎采用高分子材料结构支撑体替代传统轮胎的充气胎体结构, 轮胎与路面接触时胎面上的受力由结构支撑体分担, 轮胎滚动时支撑体可将压力进行传递, 达到与传统充气轮胎相同的减震缓冲效果。

本研究免充气安全轮胎^[9]主要由胎面、支撑结构胎体和轮辋组成, 轮胎外直径和胎面宽度参照11.00R20载重子午线轮胎取值, 如图1所示。



1—胎面花纹; 2—基部胶; 3—支撑体; 4—实体环。

图1 免充气安全轮胎结构

轮胎胎面由花纹和基部胶组成, 基部胶起连接花纹和支撑体的作用, 花纹磨平后, 可在基部胶上贴新的花纹块进行翻新, 提高轮胎的循环利用率。

支撑体内外周向分布两排组合通孔,每排均匀排列10组组合通孔,外面一排通孔由上下反向互扣的梯形结构构成,交叉形成X形的支撑结构;内排通孔均呈梯形结构。较粗的中间支柱可以保证非充气轮胎具有足够的承载能力,避免过大的压缩变形。细X形支撑臂赋予轮胎一定的弹性,缓冲来自路面的冲击和震动,保证乘坐舒适性。通孔可提高轮胎的散热率,降低轮胎的行驶温度。支撑体材料选用模量为24 MPa的热塑性聚氨酯弹性体,既具有橡胶的弹性,又具有塑料的强度。

支撑体内部连接轮辋的部位有30 mm厚的实体环,环上两侧交替排列10个凹槽,凹槽内侧大、外侧小,与对应的轮辋锁紧在一起,防止轮胎在行驶过程中脱落和在轮辋上产生周向滑动。

2 免充气轮胎模型的建立

根据前述免充气轮胎结构特点,运用Abaqus软件建立相应的几何模型,进行模拟计算的前处理,主要包括定义材料属性、划分网格、选择单元类型以及确定负荷边界条件等。

2.1 材料模型

本研究建立的免充气轮胎模型主要包括胎面、支撑结构胎体、与胎体接触的轮辋以及地面,将地面和轮辋假设为刚性体,胎体选择聚氨酯弹性体,模量为24 MPa。

胎面的主要材料是橡胶,具有体积不可压缩性本构关系。橡胶材料的本构关系是非线性函数,采用Yeoh模型^[10]描述。

2.2 单元模型

对免充气轮胎模型进行网格划分,运用Sweep网格划分技术中的进阶算法和映射网格,提高网格质量,将胎体和胎面的几何模型划分为六面体单元C3D8H。

2.3 边界条件

轮胎接地分析主要涉及轮胎与轮辋、胎面与地面两种接触问题。求解接触问题通常采用Lagrange乘子法、罚函数法及基于求解器的直接约束法等。本模型对胎面与地面接触问题采用罚函数法求解,对轮辋与胎体、胎体与胎面接触采用Tie约束法,使轮辋与支撑结构胎体、胎体与胎面结合为一个整体。在轮胎与地面的接触模拟中,设定

两者之间的摩擦因数为0.5。

3 结果与讨论

为评价本免充气安全轮胎的性能,将标准负荷下的模拟结果与相同规格11.00R20载重子午线轮胎的实测数据进行对比分析。

3.1 静态接地工况下的轮胎性能

免充气轮胎滚动过程中不同位置的垂直变形如图2所示。两个位置的结构有所不同,位置1是柱形结构起主要支撑作用,位置2是X形结构起主要支撑作用,但下沉量基本相同,垂直变形一致,可以保证轮胎行驶的平稳性。

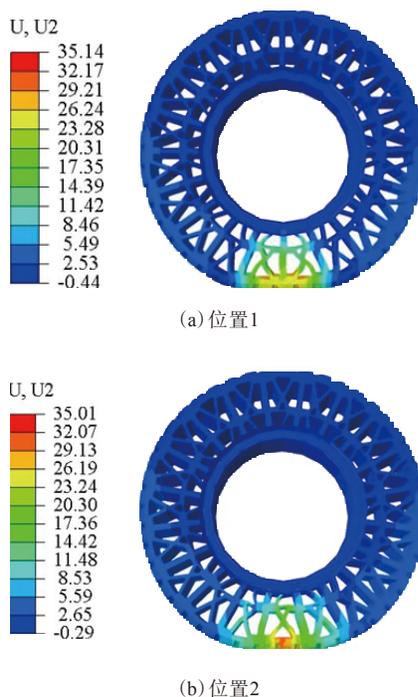


图2 免充气轮胎垂直变形

标准工况下免充气轮胎模拟与子午线轮胎实测结果对比如表1所示。

表1 标准工况下免充气轮胎模拟与子午线轮胎实测结果对比

项 目	免充气轮胎模拟值	子午线轮胎实测值
标准负荷/kN	34.79	34.79
下沉量/mm	35.14	34.30
接地面积/mm ²	39 684.5	42 838.0
平均接地压力/MPa	0.88	0.81
最大接地压力/MPa	4.69	5.31

注:标准充气压力为930 kPa。

由表1可以看出,在标准负荷下,两者的下沉量接近,但免充气轮胎的接地面积比子午线轮胎减小7.3%,平均接地压力增大8.6%,最大接地压力减小11.6%,平均压力增大使胎面磨损加剧,但最大压力减小使接地区域压力分布较子午线轮胎更均匀,可以减轻不均匀磨损。

轮胎静刚度是指轮胎静负荷时负荷增量与下沉量增量之比。轮胎的径向刚度对车辆行驶的平顺性有很大影响,具有合适的径向刚度才能保证驾驶舒适性。免充气轮胎与同规格充气子午线轮胎的静刚度曲线如图3所示。从图3可以看出,两种轮胎的静刚度曲线的吻合程度非常高,静刚度曲线的斜率代表轮胎负荷下的径向刚度,反映轮胎的承载能力和缓冲性能。

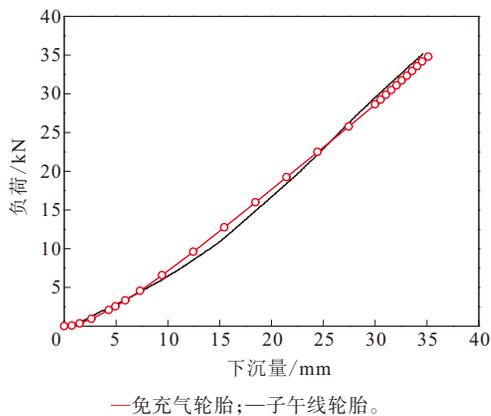


图3 两种轮胎静刚度曲线对比

上述对比分析表明,本研究免充气轮胎在标准负荷下,可以达到同规格充气子午线轮胎在刚度和负荷能力及缓冲性能方面的要求。

3.2 侧倾角对轮胎接地性能的影响

前轮在汽车上安装时具有一定的侧倾角,以获得较好的方向稳定性,改进制动性能,提高转向灵活性。同时,道路设计在横向方向预留一定倾角以便于排水。轮胎与路面接触势必存在一定倾角,造成不均匀接触和磨损。因此,研究一定侧倾角下轮胎的性能显得十分重要。本研究对免充气轮胎在侧倾角(θ)分别为 3° 、 6° 、 9° 和 12° 工况下的性能特点进行分析。图4所示为侧倾工况下的免充气轮胎有限元模型。

侧倾工况下,侧倾角对免充气轮胎和子午线轮胎接地面积和最大接地压力的影响如图5和6所

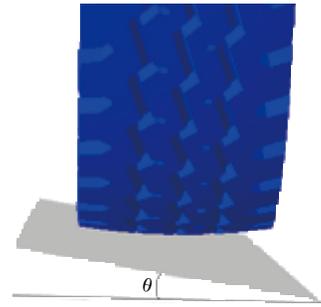


图4 侧倾工况下免充气轮胎有限元模型

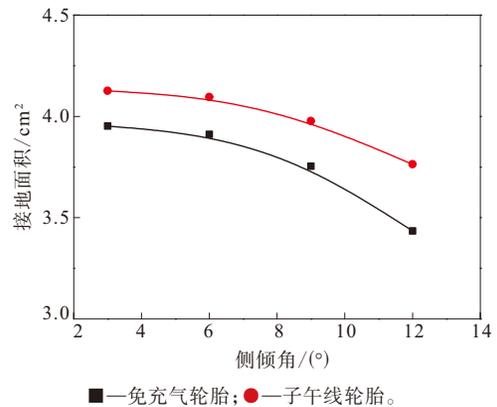
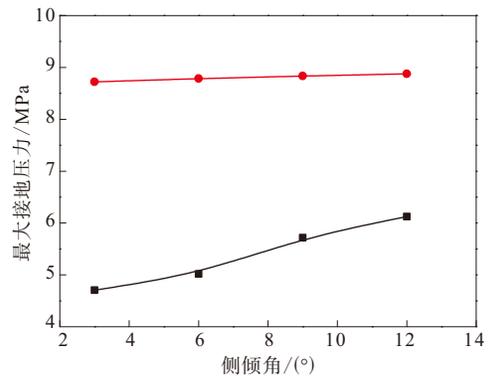


图5 侧倾角对接地面积的影响



注同图5。

图6 侧倾角对最大接地压力的影响

示。图中子午线轮胎的计算值来自文献[11]。

从图5可以看出,负荷相同时,侧倾工况下两者的接地面积变化趋势相同,均随侧倾角的增大而减小,但是两者最大接地压力值和变化趋势不同(见图6),免充气轮胎最大接地压力值较小,且随侧倾角增大而增大,而子午线轮胎基本保持不变,表明子午线轮胎的胎体将承受更大负荷,长期处于侧倾工况下,会增大轮胎的不均匀磨损,加剧胎体结构损耗,导致性能下降。

不同侧倾角下免充气轮胎与子午线轮胎的静刚度曲线比较如图7所示。从图7可以看出,随着侧倾角的增大,免充气轮胎的径向刚度降低。侧倾角为3°时,负荷较小,静刚度曲线差异较大,随着负荷增大,刚度逐渐接近。免充气轮胎侧倾接地处胎侧刚性较大,而子午线轮胎的胎侧柔软,导致相同负荷下子午线轮胎的下沉量增大,但侧倾角进一步增大,两者的静刚度曲线吻合较好。

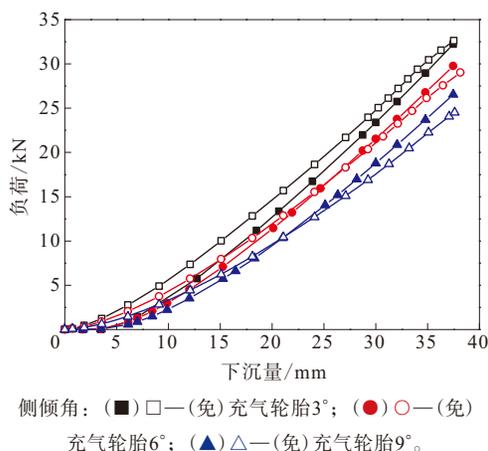


图7 不同侧倾角下轮胎的静刚度曲线

4 结论

通过建立免充气轮胎的有限元模型,对其进行静态接地和侧倾工况的模拟分析,并与同规格的11.00R20载重子午线轮胎进行性能对比,得出如下结论。

(1) 标准静负荷工况下,免充气轮胎与同规格充气子午线轮胎的下沉量接近,静刚度曲线基本吻合。相对于子午线轮胎,免充气轮胎最大接地

压力有所降低,可减轻不均匀磨损。

(2) 侧倾工况下,随着侧倾角的增大,免充气轮胎的接地面积减小,径向刚度降低,与子午线轮胎侧倾下的静刚度曲线吻合较好。

综上所述,该免充气轮胎可以达到同规格子午线轮胎的负荷能力和径向刚度及减震的性能要求,同时从根本上解决了充气轮胎易爆胎、不抗刺扎等问题。

参考文献:

- [1] 张仲志,吕建刚,宋彬,等.非充气轮胎技术的分析与展望[J].橡胶工业,2014,34(9):523-527.
- [2] 薛梓晨,贺建芸,丁玉梅,等.非充气安全轮胎的研究现状[J].橡胶工业,2014,61(10):632-635.
- [3] 高晓东,杨卫民,张金云,等.国内外非充气轮胎的最新研究进展[J].橡胶工业,2015,62(3):183-188.
- [4] Bridgestone Corp. Non-Pneumatic Tire[P]. JP:JP 177140,2013-09-09.
- [5] Hankook Tire Co., Ltd. Method of Designing Spokes of Non-Pneumatic Tire[P]. USA:USP 8 578 607,2013-11-12.
- [6] 邓海燕,关泰.安全轮胎的发展历史和未来前景[J].化工科技市场,2005(3):9-14.
- [7] 李莉,胡立臣,邵朋礼.一种新型轮胎的设计与分析[J].工程设计学报,2008,15(3):220-224.
- [8] 岳红旭,赵又群.一种新型安全车轮的非线性有限元分析[J].中国机械工程,2012,23(11):1380-1385.
- [9] 王伟,赵亚元,黄京城.一种新型免充气轮胎[P].中国:CN 20450219.1,2015-07-11.
- [10] Yeoh O H. Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1993,66(5):754-771.
- [11] 燕山.载重子午线轮胎有限元分析与实验研究[D].青岛:青岛科技大学,2013.

收稿日期:2015-09-02

Comparison of Non-Pneumatic Tire and Radial Tire by Finite Element Simulation

HUANG Jingcheng¹, WANG Wei^{1,2}

(1. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China; 2. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: By using Abaqus software, the three-dimensional finite element model of special structure non-pneumatic tire was established, its static loading and cornering state were then simulated, and the simulation results were compared with the experiment results of the same size 11.00R20 truck and bus radial tire. The results showed that, under the static loading state, the static stiffness curves were similar, the contact area

and deformation were close, and the maximum contact pressure of non-pneumatic tire was smaller. Under cornering state, the variation trends of the contact area and static stiffness curve were similar. It could be concluded that the performance of the non-pneumatic tire could match with that of the same size radial tire.

Key words: non-pneumatic tire; radial tire; ground contact analysis; finite element simulation

胶粉改性沥青铺就绿色公路

中图分类号: X783.3 文献标志码: D

在2015年11月3日开幕的第17届中国国际工业博览会上,华东理工大学展示了一种废轮胎胶粉资源化利用制备道路沥青的关键技术:废轮胎在经过加工后变废为宝,成为沥青的改性“伴侣”铺设路面。

据项目负责人周晓龙教授介绍,这项技术现已建成年产20万t的生产装置,生产的橡胶改性沥青应用在江苏省扬中市旧S238省道三栏路等道路的铺设中,目前完成约45 km,使用了约5 500 t混合料,相当于再利用了11万条家用小轿车的废旧轮胎。仅2012—2014年,该技术就创下了高达1.5亿元的总产值。

据统计,我国2014年轮胎产量超过5.62亿条,而废轮胎产生量约为1 000万t,并以每年5%~6%的速率增长。大量堆积的废轮胎不但无法自动降解,占用土地资源,还存在引发火灾、滋生蚊虫等风险。如何妥善处置这些固体废弃物,成为世界各国普遍面临的难题。

事实上,废轮胎并非一无是处,而且浑身是宝,含有高达近60%的橡胶混合物。周晓龙项目组瞄上的,正是废轮胎中的橡胶混合物。

目前废轮胎橡胶的处理方法主要有原形直接利用、热分解、旧轮胎翻新、生产再生橡胶及生产硫化胶粉。在这几种处理方法中,用废轮胎胶粉改性沥青无疑是发展循环经济的最佳利用形式。采用胶粉改性沥青铺路,不但能提高沥青的高温稳定性、低温抗裂性、抗老化和耐久性,还能替代目前被广泛使用的苯乙烯-丁二烯-苯乙烯共聚物(SBS)和丁苯橡胶等聚合物改性剂,降低道路建设成本,节约石油资源。

“相比于SBS改性沥青,胶粉改性沥青不但成本更低,其集料的抗车辙能力也更优。”周晓龙说。

废轮胎胶粉改性沥青的应用在国外已有30多

年的历史,而我国却处于起步阶段。

“胶粉原料来源复杂,因此胶粉改性沥青若要达到SBS改性沥青的稳定性能,难度较大。”周晓龙说。项目组从2006年开始研究废轮胎胶粉制备道路沥青技术,经过几年的实验室研究,2009年,该项技术在江苏文昌新材料科技有限公司进行产业化,建成了年产20万t的生产装置。

这时难题却突然而至,胶粉改性沥青若是生产后直接铺设于路面,效果极好;若是贮存2~3天后再使用,产品的性能指标就会急剧下降。项目组想了许多方法来解决这一难题,但均以失败告终。恰在此时,周晓龙参加了一个相关主题的国际会议。一位学者的发言让他恍然醒悟:设法避免产品的高温贮存过程。

“胶粉经过微波处理后,极易溶解在芳烃油中,产生的胶粘剂使得胶粉与沥青之间结合力增强,从而提高了胶粉改性沥青的存储稳定性。”周晓龙说。

现在,用废轮胎胶粉资源化利用制备道路沥青关键技术生产的道路沥青已经用于多条道路的铺设。

此外,项目组还采用催化裂化油浆为降粘剂,发明了一种乳化橡胶改性沥青;同时制备了一种质优价廉的道路沥青再生剂,用于老化道路沥青的性能恢复。

据周晓龙介绍,1997年美国立法规定:凡国家投资或资助的道路建设必须采用胶粉改性沥青,并规定胶粉的用量必须达到20%以上;在我国,目前已批准6条节能减排绿色低碳高速公路试点项目,其路面材料均是以废轮胎为原料生产的胶粉改性沥青。由此可见,优良的使用性能和对环保的巨大贡献,使胶粉改性沥青铺路技术的市场前景越来越广阔。

(摘自《中国化工报》,2015-11-06)