新型安全轮胎的设计及其有限元仿真分析

李长宇,杜云峰,宁卫明,张 聪,黄兆阁*

(青岛科技大学,山东青岛 266042)

摘要:以235/45R18子午线轮胎为基础,以质量小、弹性优异的发泡弹性聚氨酯为内支撑体制备新型安全轮胎,用非 线性有限元软件ABAQUS对其进行静态力学特性分析。结果表明:新型安全轮胎采用连通充气设计,能够在标准气压下 正常行驶,不影响其操控性和舒适性;当轮胎漏气时,内支撑体与轮胎内衬层接触,内支撑体与胎侧共同承受载荷,从而 减小胎侧部位的形变量,保证车辆能正常行驶到安全区域。

 关键词:安全轮胎;缺气保用轮胎;发泡弹性聚氨酯;内支撑体;有限元分析

 中图分类号:TQ336.1;TQ334.1
 文章编号:1000-890X (2019) 07-0529-05

 文献标志码:A
 DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2019.07.0529

轮胎是车辆唯一的接地部件,轮胎安全性是 车辆安全性的重要保证。目前车辆所配轮胎以充 气轮胎为主,一旦轮胎被刺穿漏气,它将不能再支 撑车辆,如果车辆在公路上行驶,容易发生危险。 据不完全统计,当车速达到150 km•h⁻¹时,爆胎后 驾乘人员的死亡率接近100%^[1]。业内主要用以下 两种方法来应对这个问题。

一是部分车辆配备备用轮胎,这种轮胎用于 替换发生漏气的原配轮胎。但调查发现,大部分 备用轮胎没有使用就被废弃,造成非常大的资源 浪费。另外,配备备用轮胎会增大车辆的质量,导 致油耗增大,而且替换备用轮胎时对环境要求较 高^[2-4]。基于这些原因,配备备用轮胎不能很好地 解决轮胎漏气导致的问题,此外轮胎爆破时引起 的车辆失稳问题也难以解决。

二是开发新型安全轮胎,这种轮胎能够保证 轮胎漏气后仍能支撑车辆,并能够继续行驶一定 路程,这种轮胎称为缺气保用轮胎^[5-6]。这类轮胎 不仅能够应对穿孔漏气问题,同时所配车辆无需 配备备用轮胎。因此这类轮胎的市场需求越来越 大,而且缺气保用轮胎的研究也成为轮胎行业的 一大热点。

本工作正是在这一大趋势下,以235/45R18子

作者简介:李长宇(1995—),男,山东淄博人,青岛科技大学在 读硕士研究生,主要从事轮胎有限元仿真分析工作。

*通信联系人(13808986601@163.com)

午线轮胎为基础,以发泡弹性聚氨酯(E-TPU)为 内支撑体制备了新型安全轮胎^[7]。这种安全轮胎 的抗冲击能力有一定提高,可防止汽车高速行驶 时轮胎破裂;因内支撑体为发泡材料,质量小,对 车辆质量和能耗影响较小。

1 有限元模型

1.1 模型组成

本设计安全轮胎模型由橡胶结构、帘线结构、 发泡E-TPU内支撑体结构、轮辋以及转鼓5部分构 成。首先利用非线性有限元软件ABAQUS建立 235/45R18子午线轮胎的二维截面模型,然后该模 型沿轴线旋转而建立整个轮胎的三维模型,最后 创建内支撑体的模型。发泡E-TPU内支撑体有限 元模型是以10°为一个截距打孔并将各截距阵列而 建成,如图1所示。

图1 发泡E-TPU内支撑体有限元模型

1.2 模型建立

将5个部件按照规定位置装配在一起,建立有限元仿真模型,如图2所示(转鼓和轮辋省略),其周向断面示意如图3所示。



图3 安全轮胎周向断面示意

选取相对应的材料属性,其中橡胶本构关系采用YEOH模型,其单轴拉伸的S形应力应变公式为:

 $\sigma/(\lambda-\lambda^2) = C_{10} + 4C_{20}(I_1-3) + 6C_{30}(I_1-3)^2$ 式中, λ 为主伸长率; $I_1 = \lambda^2 + 2\lambda^{-1}$; C_{10} 是初始剪切 模量, C_{20} 是变形时软化参数, C_{30} 是大应力下硬化 参数^[8-9]。 C_{10} , C_{20} 和 C_{30} 均采用实际试验数据拟合 得出。

帘线层采用弹性模型表征,发泡E-TPU内支撑体模型采用实际拉伸和应力松弛试验数据作为其材料属性参数;转鼓与轮辋模型选用刚体类型,选用C3D20H单元类型划分内支撑体模型的网格。

1.3 接触算法和边界条件

接触算法有罚函数法、Lagrange乘子法、基于 求解器的直接约束法和混合法等。本工作中胎面 与转鼓、发泡E-TPU支撑体与轮胎、轮胎与轮辋 的接触问题采用罚函数求解,摩擦因数分别设为 0.75,0.3和0.3;将帘线层嵌入到橡胶层中,约束 轮辋所有自由度,模拟轮辋固定不动,对轮胎充气 后施加载荷,模拟轮胎在路面静止的结果。

1.4 发泡E-TPU内支撑体结构优化

发泡E-TPU内支撑体在起支撑作用时会发生 弯折,在弯折部位会形成很大的集中应力,长久的 应力集中会造成使用寿命缩短,因此需对弯折部 位曲率半径进行优化。选取不同的弯折部位曲率 半径,尝试对弯折部位曲率半径进行优化,见表1 的方案A—C;另外,因不同厚度的内支撑体有不同 的应力集中,因此,在确定弯折部位曲率半径后对 内支撑体厚度也进行了优化,见表1的方案D。在 静态载荷下进行有限元分析,模拟安全轮胎的受 力情况,并根据模拟结果选取更合适的内支撑体 尺寸。

表1 发泡E-TPU内支撑体结构优化设计方案

项 目 -	方案				
	А	В	С	D	
曲率半径/mm	15	20	25	20	
厚度/mm	15	15	15	20	

2 结果与讨论

2.1 设计方案分析

无内支撑体的标准轮胎在标准气压(0.24 MPa)和标准载荷(5.6 kN)下的下沉量见图4。

从图4可以看出,最大下沉量的位置为与转鼓 接触的轮胎胎面部位,最大下沉量为23.46 mm,该 下沉量结果可以作为参考。

加入不同弯折部位曲率半径和厚度的发泡 E-TPU内支撑体的轮胎在充气内压为0.1 MPa、载 荷为标准载荷时的仿真分析结果如表2所示。

从表2可以看出,前3种方案加入内支撑体的 安全轮胎下沉量与较大缺气的轮胎(标准内压为 0.24 MPa)的下沉量和无内支撑体的标准轮胎的 下沉量相差不大,而且随着弯折部位曲率半径的 增大,下沉量减小,这是因为弯折部位曲率半径越 大,对径向载荷的吸收能力越强,导致下沉量减 小,另外内支撑体起到了支撑作用。对内支撑体 的最大Mises应力与应变能密度分析后发现,随着 内支撑体的弯折部位曲率半径增大,其最大Mises 应力与应变能密度呈现出逐渐增大的结果,通过 对比E-TPU应力分布云图与应变能密度云图发 现,随着弯折部位曲率半径的增大,弯折部位的应



图4 标准轮胎在标准条件下的下沉量

表2 轮胎模拟结果

酒 日	方案			
	А	В	С	D
下沉量/mm	30.26	29.09	28.02	27.56
内支撑体最大Mises应力/MPa	1.12	1.31	1.39	1.51
内支撑体应变能密度×10 ³ /				
$(J \cdot mm^{-3})$	0.14	0.19	0.20	0.24

力集中的位置上移,而且云图中的应力集中面积 显著缩小,因此造成了如表2中内支撑体的最大 Mises应力与应变能密度随着弯折部位曲率半径增 大而增大的结果。

因此,综合考虑表2中前3种方案各弯折部位 曲率半径对应的轮胎下沉量和应变能密度,选取 弯折部位曲率半径为20 mm的发泡E-TPU内支撑 体进行厚度为20 mm的方案D的分析。

从表2还可以看出,方案D与方案B对比, E-TPU内支撑体增厚也会减小轮胎的下沉量,但 是结果相差不是很大,仅仅相差2 mm左右,对比 内支撑体最大M ises应力与应变能密度发现,增大 内支撑体厚度与增大弯折部位的曲率半径效果相 似,二者均出现了变大的现象,原因依然是应力集 中区域变小且上移,应力分散不均匀。

主要考虑下沉量,结合其他因素,最终选定弯 折部位曲率半径为20 mm、厚度为18 mm的发泡 E-TPU内支撑体进行最终的稳态力学分析,分析 过程中内压由标准内压逐渐降低至零,内压降低 的过程中保证转鼓5 600 kN的标准载荷不变。

2.2 最终方案分析

轮胎下沉量测试结果如图5所示。 其中图5(a)为最终选定方案有发泡E-TPU内





图5 轮胎下沉量测试结果

支撑体轮胎在零气压、标准载荷下竖直方向的位 移量,最大下沉量为36.40 mm,而图5(b)为无内支 撑体轮胎在0.1 MPa气压、标准载荷下竖直方向上 的位移量,最大下沉量为41.70 mm,有内支撑体零 气压的轮胎下沉量比无内支撑体较大缺气轮胎的 下沉量要小,这充分说明了内支撑体的支撑效果 优良。

轮胎载荷与下沉量的关系曲线如图6所示。 该曲线斜率的倒数反映的是轮胎径向刚度的大 小,轮胎径向刚度与承载能力和舒适性相关。



图6 轮胎载荷和下沉量的关系曲线

从图6可以看出,随着载荷逐渐增大到标准载荷,轮胎的下沉量不断增大,而且无内支撑体轮胎的下沉量与有发泡E-TPU内支撑体轮胎的下沉量相近,这是因为在标准载荷条件下内支撑体未与轮胎内衬层接触,完全由轮胎承受载荷,不影响轮胎正常使用时的舒适度和操控性。

当发生漏气时,轮胎气压与下沉量的关系曲 线如图7所示。



图7 轮胎内压和下沉量的关系曲线

从图7可以看出,有内支撑体的轮胎下沉量变 化速度远远小于无内支撑体的轮胎,无内支撑体 的轮胎漏气后的下沉量呈现指数型增大,而有内 支撑体轮胎的下沉量近似线性增大,零气压时下 沉量仅为36.4 mm,E-TPU内支撑体对轮胎起到了 较好的缺气保用作用。

2.3 发泡E-TPU内支撑体应力分析

对发泡E-TPU内支撑体单独分析,其Mises应力分布如图8所示。

从图8可以看出,内支撑体的Mises应力主要



图8 发泡E-TPU内支撑体Mises应力分布 集中在弯折部位以及近轮辋区域,近轮辋区域应 力分布较分散,而弯折部位应力集中现象较为严 重,因此弯折部位出现损坏的可能性较大,但内支 撑体只是在特殊情况(漏气或局部冲击等)才发挥 一段时间的作用,保证车辆能正常行驶到安全区 域,因此这个缺陷是在允许范围的。

3 样胎试验

为了验证本设计方案的仿真分析结果准确 性,制备样胎,样胎测试如图9所示。



图9 样胎测试

测试样胎在标准气压下与不充气下承受5.6 kN载荷时的下沉量,即当气压分别为0,0.1和0.24 MPa时,下沉量分别为38.1,30.7和26.3 mm。有 发泡E-TPU内支撑体轮胎的试验结果与仿真分析 结果(图7拟合曲线结果)基本一致,确定了该模型 设计与分析的正确性。

4 结论

(1)发泡E-TPU内支撑体不影响安全轮胎正 常使用时的接地性能,标准条件下安全轮胎与标 准轮胎操控性和舒适性差别不大。 (2)当安全轮胎缺气、内压减小时,发泡 E-TPU内支撑体是主要的受力部件,安全轮胎的 下沉量增长速度比标准轮胎慢很多,内支撑体产 生变形,分散和承担载荷,并提供一定的舒适性, 同时减小了胎侧部位的变形。

(3)基于ABAQUS软件的有限元分析可用于 安全轮胎的设计,试验也证明了其仿真分析的可 靠性。

参考文献:

- [1] Cai Y, Zang M, Duan F. Modeling and Simulation of Vehicle Responses to Tire Blowout[J]. Tire Science and Technology, 2015, 43
 (3):242–258.
- [2] 王文峰,雍占福,王裕成,等.聚氨酯支撑结构免充气轮胎仿真模拟 与优化[J].工程塑料应用,2018,46(5):48-51.
- [3] Ejsmont J A, Jackowski J, Luty W, et al. Analysis of Rolling

Resistance of Tires With Run Flat Insert[J]. Key Engineering Materials, 2014, 597 (597) :165–170.

- [4] 李文博,冯琳阁,赵长松,等.载重子午线轮胎静态接地影响因素的 有限元分析[J].橡胶工业,2013,60(6):338-343.
- [5] 李汉堂. 漏气保用轮胎[J]. 世界橡胶工业, 2014, 41(2): 22-26.
- [6] Nandhu S, Jayan A K, Ahmed J S, et al. Analysis of Polyurethane Filled Solid Tire[J]. Advanced Materials Research, 2014 (984–985) : 464–468.
- [7] 单体坤,马文良,秦柳,等.超临界二氧化碳制备热塑性聚氨酯弹 性体发泡材料的发泡机理和性能研究[J].橡胶工业,2018,65(5): 514-517.
- [8] Kumar A S, Kumar R K. Force and Moment Characteristics of a Rhombi Tessellated Non-Pneumatic Tire[J]. Tire Science & Technology, 2016, 44 (2): 130–148.
- [9] 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.

收稿日期:2019-01-23

Design and Finite Element Simulation Analysis of New Type Safety Tire

LI Changyu, DU Yunfeng, NING Weiming, ZHANG Cong, HUANG Zhaoge (Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: New type safety tire using foamed elastic polyurethane inner support with light weight and excellent elastic resilience was designed based on 235/45R18 radial tire. Then the static mechanical properties were analyzed by nonlinear finite element software ABAQUS. This new type safety tire was designed with connected inflatable structure, providing good driving comfort under standard inflation pressure. When the inflation pressure of tire was lower than the required, the inner support body contacted with tire inner liner, and supported the load with the sidewall. Thus, the deformation of the sidewall could be reduced, which ensured the normal driving of the vehicle to the safe area.

Key words: safety tire; run flat tire; foaming elastic polyurethane; inner support body; finite element analysis

一种复合橡胶补强剂及其制备方法 和应用 由浙江工业大学温州科学技术研究 院申请的专利(公开号 CN 107245167A,公开 日期 2017-10-13)"一种复合橡胶补强剂及 其制备方法和应用",涉及的补强剂由垃圾焚烧 飞灰(20~40份)、复合络合剂(1~4份)、埃洛石 (30~40份)、活性炭(30~40份)和水(4~10份)组 成。其制备方法为:(1)将复合络合剂溶于水,形 成复合络合剂水溶液,加入垃圾焚烧飞灰后得到 络合垃圾焚烧飞灰; (2)将络合垃圾焚烧飞灰经 干燥、粉碎后加入埃洛石和活性炭,置于高速混合 机中进行混合复合,复合物粉碎后得到产品。该 补强剂可与炭黑和白炭黑配合使用,改善胶料的 耐磨性能、耐水性能、耐油性能和耐热性能,同时 实现了焚烧飞灰的无害化及资源化再利用。该发 明采用高速混合复合工艺,反应过程无废水和废 气产生,工艺简单,能耗低。

(本刊编辑部 赵 敏)