

复杂工况下航空轮胎胎体帘线力学性能研究

吴健, 陈达, 陈龙, 王友善, 栗本龙, 崔志博

[哈尔滨工业大学(威海) 橡胶复合材料与结构研究所, 山东 威海 264209]

摘要: 基于某型号航空轮胎的几何尺寸与材料参数, 采用有限元方法建立轮胎二维和三维有限元模型, 研究不同充气压力和负荷下胎体帘线应力和轮胎变形规律。结果表明: 随着充气压力增大, 胎体帘线应力增大; 随着负荷的增大, 胎体帘线应力增大, 最大应力出现在轮胎中心高度上的胎肩附近; 充气后胎体帘线在中间产生突起, 加载后离地端帘线变形类似进一步充气, 而接地端帘线中间位置与路面贴合, 胎侧产生较大突起。可通过结构设计改善航空轮胎骨架材料力学性能。

关键词: 航空轮胎; 胎体帘线; 充气压力; 负荷; 应力; 有限元分析

中图分类号: U463.341⁺.6; O241.82

文献标志码: A

文章编号: 1006-8171(2020)07-0401-05

DOI: 10.12135/j.issn.1006-8171.2020.07.0401



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

航空轮胎是飞机与机场路面接触的唯一部件, 其特性影响着飞机的乘坐舒适性、油耗、操纵性和安全性。骨架材料是航空轮胎的重要组成部分, 作业过程中其承受着大部分的负荷, 而帘线的应力分布状况更直接决定着轮胎的使用性能。由于我国航空轮胎研制起步较晚, 目前大飞机航空轮胎几乎全部由米其林等少数国外轮胎巨头提供, 国内对于帘线力学性能的研究也较少。

图1为某型号航空轮胎的结构示意^[1]。由于材料的不均匀分布等会导致胎面脱离事故(见图2), 因此, M. Xie等^[2-4]研究了航空轮胎裂纹的产生机理, 发现帘线末端切断处粘合强度显著降低, 且由于胎面花纹条结构不合理导致磨损不均匀, 使得帘线末端附近应力较集中, 并对轮胎的骨架材料等设计提出改进意见。

航空轮胎是一种粘弹性的非线性复合材料结构(帘线分布见图3), 滚动过程中的周期性大变形引起急剧升温 and 轮胎滚动阻力增大。D. C. Prevorsek等^[5]通过最小化轮胎高速滚动过

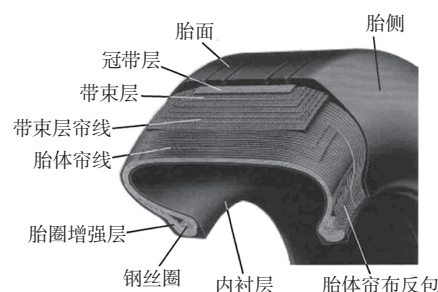


图1 某型号航空轮胎结构示意图



图2 胎面脱离事故轮胎

程中的驻波来降低滚动阻力, 从而减小帘线机械损耗。H. Guo等^[6]用梁单元对帘线进行建模(见图4)。在M. Behroozi等^[7]的建模方法中, 帘线单元被认为是嵌入表面, 厚度与其顶部厚度相比可忽略不计。A. Kongo Kondé等^[1]提出了正交各向异性弹性模型、各向同性超弹性模型和钢筋模型等3种帘线的建模方式。结果表明, 钢筋模型是在静态和准静态载荷条件下对轮胎行为进行建模最准确

基金项目: 国家自然科学基金重大项目课题(51790502); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2018QEE004); 山东省重点研发计划项目(2019GGX102051)

作者简介: 吴健(1984—), 男, 浙江义乌人, 哈尔滨工业大学(威海)副教授, 博士, 主要从事橡胶及其复合材料、轮胎力学等研究工作。

E-mail: wujian@hitwh.edu.cn



图3 航空轮胎帘线分布

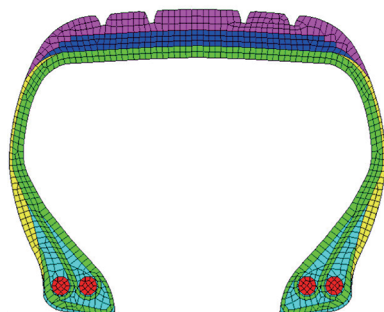


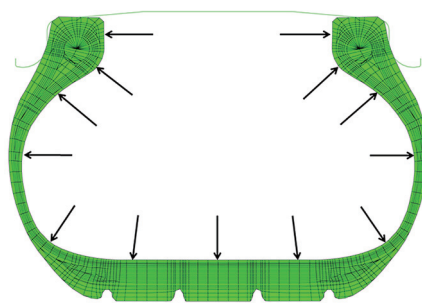
图4 航空轮胎二维有限元模型

的方法。N. Korunovic等^[8]发现帘线的线性模型在拟合与计算时更简单、更快速,而Yeoh模型能够生成光滑的拟合曲线,却不能精确地逼近轮胎帘线应力-应变曲线的具体形状,尤其在压缩情况下。Marlow模型基于拉伸数据可以精确地拟合,但要求测试数据拟合曲线非常光滑,导致收敛速度相对较慢且需要更多计算资源。N. K. Jha等^[9]提出了能够很好地预测帘线-橡胶复合材料疲劳损伤与热力学效应的有限元模型。M. Shiraishi等^[10]也建立了轮胎详细模型。

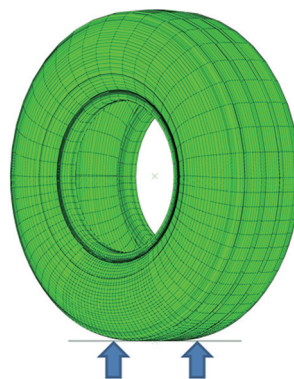
由以上分析可见,现有研究多集中在轮胎整体力学性能,对帘线力学性能的关注则相对较少,而帘线的应力分布不合理会导致爆胎等安全事故,因此有必要对其进行深入分析。

1 有限元模型

采用TYABAS有限元软件对航空轮胎材料分布图进行网格划分,对单元节点的边界条件进行指定^[11-13],设定各材料参数,输入轮胎数据曲线,得到航空轮胎有限元模型如图5所示。其中帘线建模方式采用壳体截面特性,选择表面截面并依次指定帘线的材料、截面积、间距与铺设方向。对内衬层施加均布负荷来实现充气仿真。最终模型共有4 814个节点,4 730个CGAX4H单元。在Abaqus



(a) 二维模型



(b) 三维模型

图5 航空轮胎有限元模型

中,将二维模型旋转,并建立刚体路面,生成三维有限元模型。加载过程通过对刚体路面绑定参考点并施加竖直向上的负荷来实现,三维模型共有356 164个节点,350 020个CGAX4H单元。

2 帘线的力学性能研究

2.1 二维充气状态分析

航空轮胎充气过程的有限元仿真通过二维轮胎模型来实现。充气后得到航空轮胎截面Mises应力分布如图6所示,其中帘线的Mises应力分布如图7所示。

由图6和7可见,应力主要集中在帘线上,因此有必要对其应力状况做进一步分析。

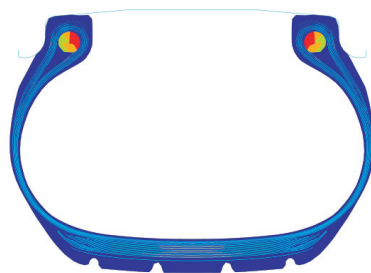


图6 1.4 MPa充气压力下轮胎截面Mises应力分布

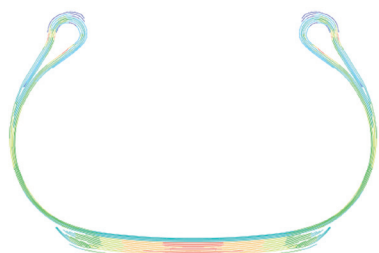


图7 1.4 MPa充气压力下帘线Mises应力分布

对比不同充气压力下胎体帘线的应力变化情况,其应力状况采用S11应力来表征(见图8)。分析结果表明,随着充气压力的增大,胎体帘线S11应力整体增大。此外,最大应力出现在胎圈外部靠近钢丝圈处,这是由于该部位帘布层处于钢丝圈与轮辋之间,在轮胎充气与加载后受到两者的挤压而导致的。

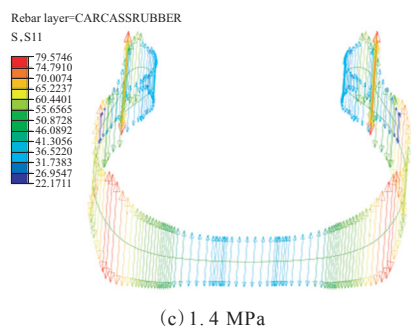
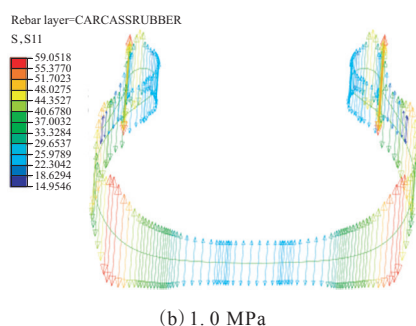
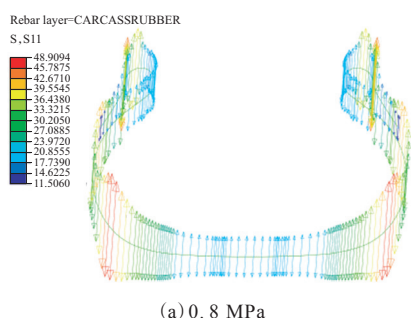


图8 不同充气压力下胎体帘线的S11应力

2.2 三维加载分析

航空轮胎加载过程的有限元仿真利用三维轮胎模型来实现,加载变形如图9所示。将航空轮胎有限元模型从中间剖开,观察截面上帘线的应力状况,结果如图10所示。

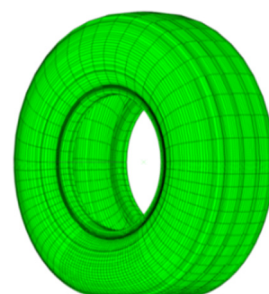


图9 加载变形示意

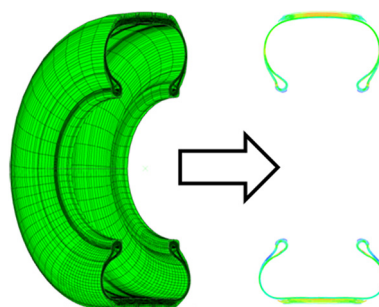


图10 截面帘线应力

在充气压力为1.4 MPa的情况下,负荷分别为3 000,6 000和9 000 kg时,胎体帘线的S11应力如图11所示。

结果表明,随着负荷的增大,胎体帘线S11应力随之增大,最大应力出现在轮胎中心高度上的胎肩附近。接地后,接地端胎体帘线的拉伸得到缓解。接地端内腔被压缩,导致轮胎内部充气压力增大,使得离地端产生类似进一步充气的效果,胎体帘线被进一步拉伸,应力增大,胎肩和钢丝圈外侧附近尤为明显,因而导致离地端应力普遍比接地端大。

2.3 帘线受力变形

航空轮胎充气后,胎体帘线在不同位置发生不同程度变形,如图12所示。

充气后在中间位置产生的突起最大,胎侧位置次之,其他位置变形较小,见图12(a);加载后轮胎离地端胎体帘线进一步突起,其变形与充气过程相似并较之增大,见图12(b);加载后接地端变

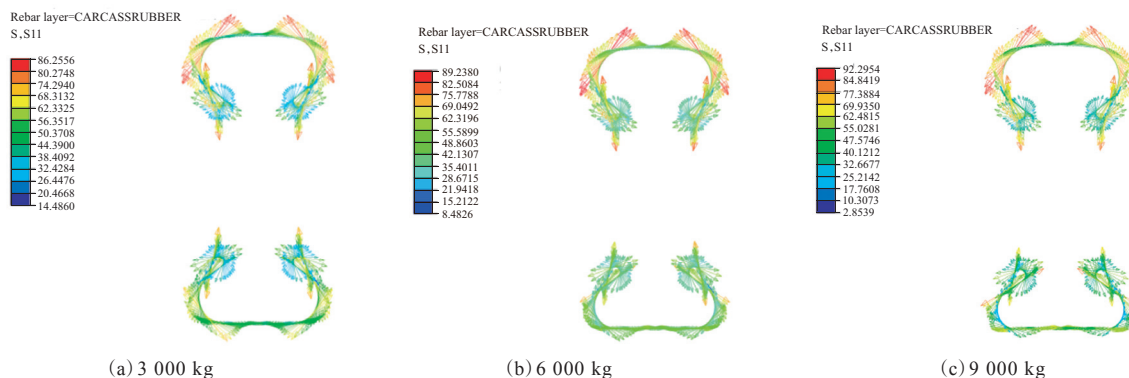


图11 不同负荷下胎体帘线的S11应力

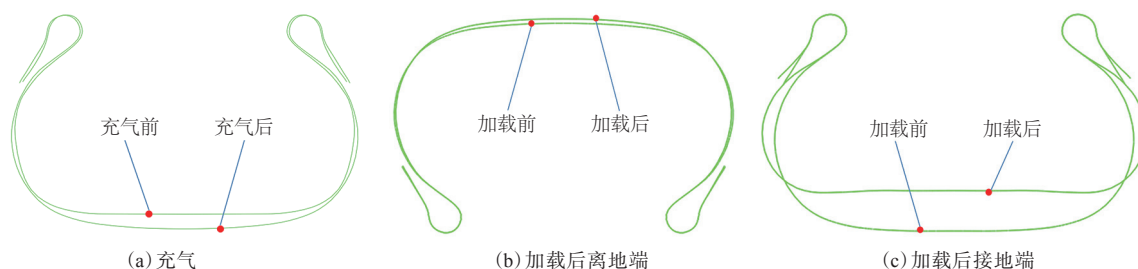


图12 胎体帘线受力变形情况示意

形方式则完全不同,接地端帘线中间位置被压平至几乎与路面贴合,并向轮辋方向产生大量缩进,在胎侧部位产生很大幅度突起,帘线末端也随之向外翘起,见图12(c)。

3 结论

航空轮胎充气压力及负荷对胎体帘线应力分布和变形产生很大影响,基于二维和三维有限元分析,对不同充气压力和负荷作用下的胎体帘线力学性能进行了研究,得到如下结论。

(1) 胎体帘线应力随充气压力增大而增大,最大应力出现在钢丝圈外侧附近,该位置附近应力较为集中,易成为失效隐患,因此应增设帘线来改善应力分布。

(2) 加载后轮胎离地端应力进一步增大,而接地端应力状况得到改善。胎体帘线应力随负荷增大而增大,其最大应力出现在轮胎中心高度上的胎肩附近,这与轮胎失效常在该位置发生的事实相符合。

(3) 充气后胎体帘线在中间产生突起,加载后离地端帘线变形类似进一步充气,而接地端帘线中间位置与路面贴合,胎侧产生较大突起。应通

过轮胎的设计调整将变形控制在一定范围内。

参考文献:

- [1] Kongo Kondé A, Rosu I, Lebon F, et al. On the Modeling of Aircraft Tire[J]. Aerospace Science & Technology, 2013, 27(1): 67-75.
- [2] Xie M, Tang H, Yao H. Failure Analysis of Tire Separation in Two-sized Tires on Airbus Planes[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 61(3): 21-27.
- [3] Huang Y S, Yeoh O H. Crack Initiation and Propagation in Model Cord-Rubber Composites[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1989, 62(4): 709-731.
- [4] Daws J W. Failure Analysis of Tire Tread Separations[J]. Practical Failure Analysis, 2003, 3(5): 73-80.
- [5] Prevorsek D C, Beringer C W, Kwon Y D. Design of Tire Cords: Optimization of Viscoelastic Properties[C]. ACS Symposium Series, Polymers for Fibers and Elastomers. Washington: American Chemical Society, 1984: 371-395.
- [6] Guo H, Bastien C, Blundell M, et al. Development of a Detailed Aircraft Tyre Finite Element Model for Safety Assessment[J]. Materials & Design, 2014, 53: 902-909.
- [7] Behrooz M, Olatunbosun O A, Ding W. Finite Element Analysis of Aircraft Tyre—Effect of Model Complexity on Tyre Performance Characteristics[J]. Materials & Design, 2012, 35(3): 810-819.
- [8] Korunovic N, Fragassa C, Marinkovic D, et al. Performance Evaluation of Cord Material Models Applied to Structural Analysis of

- Tires[J]. Composite Structures, 2019, 224: 111006.
- [9] Jha N K, Nackenhorst U. Fatigue Mechanisms of Cord-Rubber Composites[J]. Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, 2015, 15 (1): 133-134.
- [10] Shiraishi M, Yoshinaga H, Iwasaki N, et al. Making FEM Tire Model and Applying it for Durability Simulation[C]. Proceedings of the 6th International LS-Dyna Users Conference, Detroit: 2000.
- [11] 王友善. 轮胎有限元分析与优化系统[J]. 轮胎工业, 2009, 29 (1): 21-23.
- [12] 李长宇, 杜云峰, 宁卫明, 等. 新型安全轮胎的设计及其有限元仿真分析[J]. 橡胶工业, 2019, 66 (7): 529-533.
- [13] 刘云鹏, 周涛, 杨晓光. 有限元分析在轮胎结构设计中的应用[J]. 轮胎工业, 2019, 39 (5): 263-267.

收稿日期: 2020-02-28

Study on Mechanical Properties of Aircraft Tire Carcass Cord under Complex Conditions

WU Jian, CHEN Da, CHEN Long, WANG Youshan, SU Benlong, CUI Zhibo

(Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: Based on the geometric size and material parameters of a certain type of aircraft tire, two-dimensional and three-dimensional finite element models of the tire were established by using finite element method. The carcass cord stress and tire deformation under different inflation pressures and loads were investigated. The results showed that, with the increase of inflation pressure, the stress of carcass cord increased. With the increase of load, the stress of carcass cord increased, and the maximum stress appeared near the shoulder of tire center height. After inflation, the carcass cord was bulged in the middle. With loading, the deformation of the cord away from the ground end was similar to that under further inflation. However, the middle position of the cord close to the ground end fit the road surface, and the sidewall was bulged greatly. The mechanical property of aircraft tire skeleton material could be improved by structural design.

Key words: aircraft tire; carcass cord; inflation pressure; load; stress; finite element analysis

双钱集团自主研发轨道交通轮胎新技术

双钱集团上海轮胎研究所有限公司研发的“新型轮式轨道交通配套轮胎开发”项目近日被列入《2020年度中国石油和化学工业联合会科技指导计划》。

双钱集团根据轨道交通车型的技术要求,开发和引进轨道交通轮胎制造所需的零度缠绕设备,形成轨道交通轮胎产品设计和工艺技术,成功地自主研发制出305/70R22.5, 6.00R9和445/65R22.5轨道交通轮胎。轨道车辆由于转弯半径小,易导致轮胎异常磨损,轮胎的合理设计可以改善异常磨损,这取决于车辆与轮胎匹配动态特性。通过开发抗湿滑的胎面胶配方和胎面新花纹能大大提高轮胎抓着力,保证车辆的行驶安全性。近年来,双钱集团技术中心在企业发展战略的指导下,对企业的技术创新工作进行统一规划,通过与高校搭建产学研合作平台,带动了企业各职能部门科研工作的

开展,为企业开创了技术创新的崭新局面。

(双钱集团上海轮胎研究所有限公司 苏 博)

全钢子午线轮胎胎面橡胶组合物

由三角轮胎股份有限公司申请的专利(公布号 CN 110713632A, 公布日期 2020-01-21)“全钢子午线轮胎胎面橡胶组合物”,涉及的橡胶组合物配方为天然橡胶(NR) 100, 炭黑 15~25, 白炭黑 25~40, 硅烷偶联剂 1.5~3, 氧化锌 2~4, 硬脂酸 1~3, 高效偶联活性剂 2~5, 防护蜡 1~2, 防老剂 3~5, 硫黄 1.5~2.5, 促进剂 1.5~2.5。本发明采用了高效偶联活性剂,可以减小硅烷偶联剂的用量,在不损失胶料加工性能和耐磨性能的同时,降低轮胎的滚动阻力;由于增强了NR与白炭黑的相互作用,可以提高胶料的强度,改善填料分散性。

(本刊编辑部 储 民)