

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2012.11.009

胎体结构对塑料轮胎性能影响的仿真研究及结构优化

赵鹏, 杨卫民

(轮胎设计与制造工艺国家工程实验室, 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘要:以有限元分析软件为平台,建立了不同胎体结构的塑料轮胎的三维有限元模型,得到了胎体等效应力和胎面接地应力分布以及轮胎径向刚度和横向刚度特性曲线,深入揭示了胎体结构对轮胎疲劳性能、耐磨性能、乘坐舒适性能和操控转向性能的影响。在此基础上提出了一种胎体结构优化方案,极大地改善了胎面应力分布,有效减小了胎面的不均匀磨损程度。

关键词:汽车;轻量化;塑料轮胎;有限元;优化

中图分类号: TQ317.9; U463.34

文献标识码: A

文章编号: 1001-3539(2012)11-0034-04

Influence of Plastic Tire Body Structure on Its Performance and Structure Optimization

Zhao Peng, Yang Weimin

(The National Engineering Laboratory of Tire Design and Manufacturing Process,

College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Different 3D finite element plastic tire model were established by using finite element analysis software. The mises stress and contact stress distribution were obtained, as well as the radial stiffness and the transverse stiffness performance curve of the different tires, which revealed the influence of the tire structure on the fatigue performance, wear resistance performance, comfort performance, and control performance furtherly. On the basis of the above analysis, a new structure which greatly improved the stress distribution of tread, also reduced the uneven wear degree of tread was provided.

Keywords: automobile; lightweight; plastic tire; finite element; optimization

随着能源危机的不断加剧,汽车轻量化发展趋势日益明显,塑料轮胎逐渐成为今后轮胎发展的重要方向。轮胎是影响汽车性能的重要部件之一,它直接与路面接触,承受着汽车的质量,保证车轮和路面间有良好的附着性,提高汽车的牵引性、制动性和通过性^[1]。自1888年邓禄普制成橡胶空心轮胎以来已有一个多世纪的历史,在这漫长的时间里,性能优越的子午线轮胎逐渐取代斜交胎成为世界轮胎发展的主流,一系列高性能子午线充气轮胎应运而生。米其林公司将“破坏创新”引入轮胎世界^[2],于2005年初在北美国际汽车博览会上展出其“Tweel”轮胎——一种非充气的轮毂一体型塑料轮胎,提出了一种否定充气轮胎的创新研发理念,并推出了不同形式的“Tweel”轮胎,有望改变现行轮胎工业的格局。

笔者基于米其林的“Tweel”轮胎,建立了不同胎体结构的塑料轮胎模型,并采用有限元分析软件对其在不同工况下的应力分布和特性曲线进行了对比分析,进一步揭示胎体结构对塑料轮胎性能的影响,

同时为新型塑料轮胎胎体结构的改进提供合理的科学依据。

1 有限元模型的建立

1.1 材料模型

塑料轮胎主要由两部分组成:带有花纹的胎冠层和弹性胎体层。根据轮胎的性能要求,需要对胎冠和胎体选择合适的材料。聚氨酯材料具有优异的耐磨性能,硬度范围宽,具有高强度、高伸长率、高撕裂强度和大的负载支撑容量以及好的吸音减震效果^[3],是塑料轮胎理想的选材。胎冠部分的聚氨酯弹性体可近似视为不可压缩超弹性材料,其本构关系是非常复杂的非线性函数,笔者采用Mooney-Rivlin本构方程来描述胎冠聚氨酯弹性体,其应变能密度函数可描述为: $W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3)$,式中, I_1 和 I_2 分别为第一和第二不变量, C_{10} 和 C_{01} 两个材料常数由试样的拉伸试验获得^[4]。胎体聚氨酯选用线

联系人:杨卫民,教授,主要从事高分子材料加工成型与先进制造技术的研究

收稿日期:2012-08-19

弹性模型,其杨氏模量选用 510 MPa,而泊松比根据材料的特性取 0.38。

1.2 单元模型

轮胎胎面的聚氨酯弹性体近似视为不可压缩材料,其模拟选用 8 节点的完全积分常压力杂交六面体单元(C3D8H);轮胎受载时轮辐变形较大,网格存在扭曲变形,而 8 节点的六面体减缩积分实体单元(C3D8R)在网格扭曲时分析精度不会受到很大的影响,因此胎体轮辐采用 C3D8R,并选择增强“沙漏”控制^[5];与轮辐连接的轮辋部分变形较小,为了使轮辐连接部位的网格过渡良好,与轮辐连接的轮辋采用十节点二次四面体单元(C3D10)。

1.3 边界条件

充气轮胎的接触主要包括轮胎与路面的接触,轮胎与轮辋的接触。本研究的塑料轮胎区别于充气子午线轮胎,轮辋与胎体固联在一起,因此模拟过程中轮辋与胎体采用绑定约束,同时胎面与胎体也采用绑定约束。轮胎与地面的接触问题属于带约束条件的泛函极值问题,最常用的方法有 Lagrange 乘子法、罚函数法以及基于求解器的直接约束法^[6]。笔者采用罚函数法求解轮胎与地面的接触问题。众所周知,轮胎与地面之间的摩擦系数受多种因素的影响,为了简化模型,胎面与路面之间的摩擦系数取 0.8,同时将路面和轮辋简化为刚体。图 1 为不同胎体结构的轮胎接触地面的有限元模型。

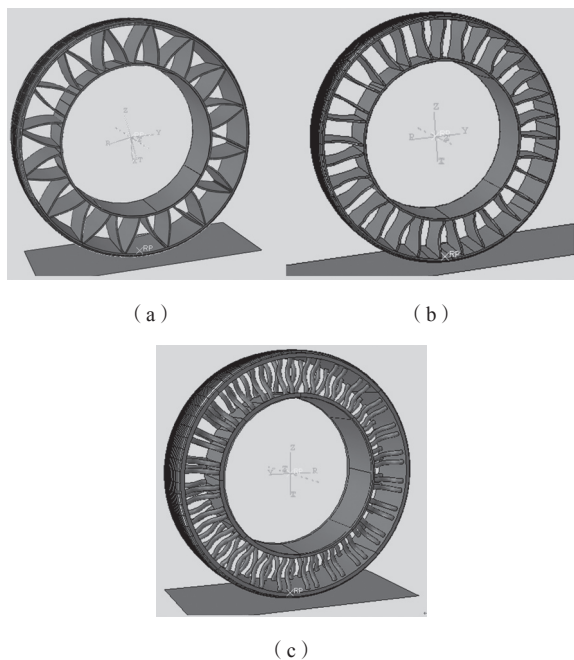
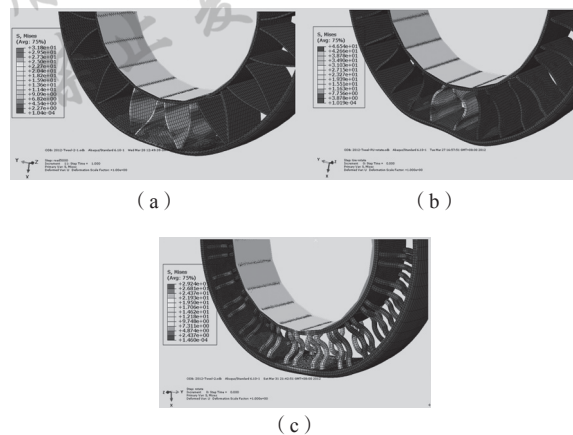


图 1 三维轮胎接触地面有限元模型

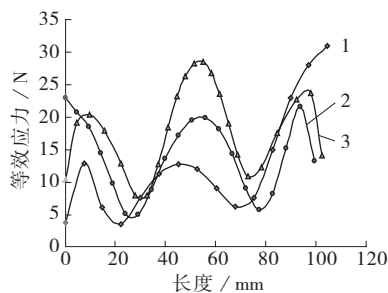
2 有限元结果对比分析

非充气塑料轮胎结构的不连续使其在不同接触情况下受载时轮辐的应力和胎面的接触应力有所差异。图 2、图 3 为塑料轮胎的总应力分布云图和轮辐应力分布曲线图。由图 2、图 3 可知,在相同的负载下,不同的胎体结构,其应力分布和应力水平都有所差异。辐板式塑料轮胎 I 的高应力区分布在轮辐与下轮辋的接触部位,且应力水平急剧增大;辐板式塑料轮胎 II 在辐板边缘和中间部位的应力最大,其应力水平接近;辐条式塑料轮胎的最大应力区集中在辐条中部。轮胎在行驶过程中,周期性的应力变化容易使轮辐高应力部位产生疲劳破坏,进而降低轮胎的使用寿命。综合对比 3 种胎体结构的应力分布和应力水平,辐板式塑料轮胎 II 的胎体结构最佳,据此可以推测,减小辐板的倾斜角度,增加辐板个数有利于改善应力分布,从而增加轮胎的使用寿命。



a—辐板式塑料轮胎 I; b—辐板式塑料轮胎 II; c—辐条式塑料轮胎

图 2 塑料轮胎总体应力分布云图

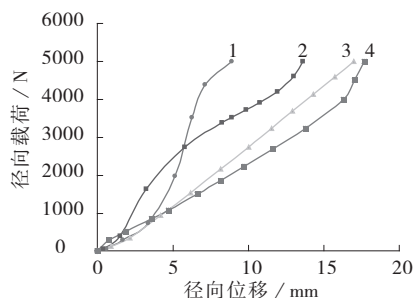


1—辐板式塑料轮胎 I; 2—辐板式塑料轮胎 II; 3—辐条式塑料轮胎

图 3 塑料轮胎轮辐应力分布

图 4 为轮胎的径向刚度特性曲线。由图 4 可知,相比充气子午线轮胎,辐板式塑料轮胎的径向刚度有很大提高,而辐条式塑料轮胎相差不大,并且适当增大辐板的倾斜角度可以增加轮胎的承载能力,但

其乘坐舒适性有所下降。

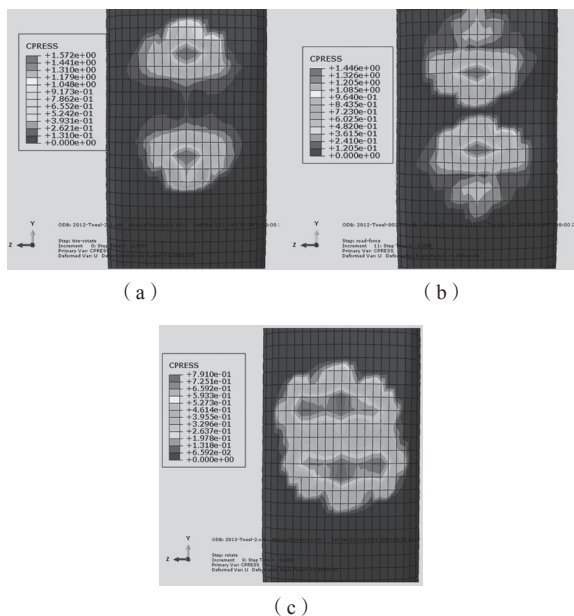


1—辐板式塑料轮胎 I; 2—辐板式塑料轮胎 II;

3—辐条式塑料轮胎; 4—充气轮胎

图4 塑料轮胎径向刚度特性曲线

图5为静载荷作用下轮胎接触应力分布云图。由图5可知,辐板式塑料轮胎的接地印痕是不连续的,辐板联接部位的胎面应力最大,而辐板之间的胎面部分有上凹的趋势,此部分胎面与地面之间不发生接触。辐条式塑料轮胎的接地印痕近似呈椭圆形,高应力区分布在椭圆长轴的两端部位,其整体接触应力水平明显小于辐板式塑料轮胎,因此,辐条式塑料轮胎的耐磨性高于辐板式塑料轮胎,但其抓着力远不及辐板式塑料轮胎。对比两种形式的辐板式塑料轮胎,辐板个数和倾斜角度对胎面的接触应力分布有很大影响,减小辐板的倾斜角度,增加辐板数量对于改善胎面的应力分布和减小应力水平有着重要意义。

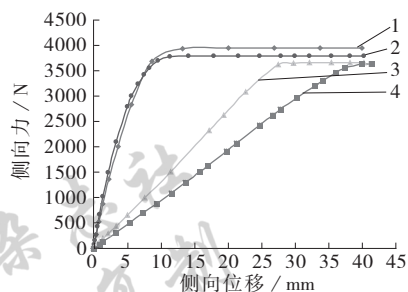


a—辐板式塑料轮胎 I; b—辐板式塑料轮胎 II; c—辐条式塑料轮胎

图5 静载工况下轮胎接触应力分布云图

轮胎的横向刚度直接影响汽车的操控和转向性能。不同胎体结构的塑料轮胎的横向刚度特性曲

线如图6所示。由图6可知,在一定范围内,侧向位移随侧向力的增大而增加,但当侧向力达到一定值时,轮胎出现侧向滑移,侧向位移急剧增大。对比相同工况下充气子午线轮胎的横向刚度,塑料轮胎的横向刚度有所增大,其中辐板式塑料轮胎在较大的侧向力作用下侧向位移相对较小,有利于实现车辆良好的操纵性能,而辐板的数量和倾斜角度对横向刚度影响较小。因此,胎体结构在很大程度上影响轮胎的横向刚度,进而影响车辆的操纵性和行驶安全性。



1—辐板式塑料轮胎 I; 2—辐板式塑料轮胎 II;

3—辐条式塑料轮胎; 4—子午线轮胎

图6 塑料轮胎横向刚度特性曲线

综合上述3种不同胎体结构的塑料轮胎,辐板式塑料轮胎 I 的承载能力和转向性能较好,辐板式塑料轮胎 II 的抗疲劳性能、抓地性能和操纵性能较好,但两种辐板式塑料轮胎均存在严重的不均匀磨损现象;辐条式塑料轮胎的乘坐舒适性和耐磨性能较好,但胎体的应力水平较高,抗疲劳性能不佳,操控和转向性能也劣于辐板式塑料轮胎。

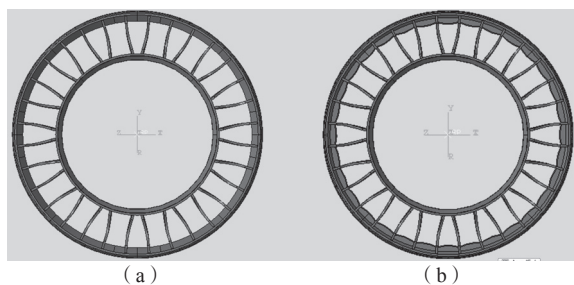
3 胎体结构优化

对比两种不同形式的辐板式塑料轮胎,随着辐板倾斜角度的减小和数量的增多,接地印痕的连续性变好,但不可避免出现辐板之间胎面上凹的现象,使部分胎面不接触地面,这在一定程度上提高了轮胎的抓地性能,但也加剧了轮胎胎面的不均匀磨损程度,大大降低了轮胎的使用寿命。因此,通过对胎体结构进行优化来改善轮胎的接地印痕以及接地应力分布,对于提高轮胎的使用寿命有着重要的意义。

改进前的胎体结构如图7a所示,辐板直接连接在平轮辋上,有限元分析结果表明,此种结构的塑料轮胎在辐板之间的胎面有上凹的趋势,极大增加了胎面的不均匀磨损程度。因此,建议在辐板之间连接横向筋来消除胎面上凹的现象,改进后的结构如图7b所示。

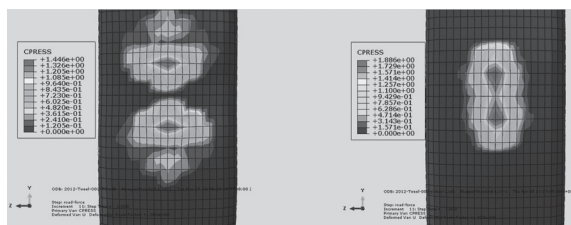
对比两种胎体结构的轮胎在静载工况下的接

触应力分布,如图 8 所示。



a—改进前;b—改进后

图 7 改进前后的胎体结构图



(a)

(b)

a—改进前辐板式塑料轮胎;b—改进后辐板式塑料轮胎

图 8 静载工况下塑料轮胎接触应力分布云图

由图 8 可知,胎体改进后的轮胎接地印痕是连续的,基本呈椭圆状,高应力区集中在胎冠中部,其应力水平相比改进前略有提高,分析其原因,主要是横向筋使胎体的刚度变大,轮胎受载时胎体变形减小,因此接地面积减小,接触应力增大。改进后的塑料轮胎接触地面时的整体应力水平虽然有所提高,但其接地应力分布有很大改善,不均匀磨损现象减轻;同时通过减小筋板的厚度来降低胎体的刚性,

从而增大接触面积,减小接触应力,改善轮胎的耐磨性能,有着重要的实际意义。

4 结论

以有限元分析软件为平台,建立了 3 种不同胎体结构的塑料轮胎有限元模型,对其进行了静载工况下胎体等效应力和胎面接地应力的分析,同时得到了不同结构形式的塑料轮胎的径向刚度和横向刚度特性曲线。研究对比发现,辐条式塑料轮胎的乘坐舒适性和耐磨性能较好,但抗疲劳性能不佳,操控和转向性能也劣于辐板式塑料轮胎,辐板式塑料轮胎的抗疲劳性能、抓地性能和操纵性能较好,但存在严重的不均匀磨损现象。针对这一现象,笔者提出了一种胎体改进结构,并对改进后的轮胎进行了接地分析,分析结果表明应力分布有很大地改善,对减小塑料轮胎的不均匀磨损有着重要的意义。

参考文献

- [1] 辛振祥,邓涛,王伟.现代轮胎结构设计[M].北京:化学工业出版社,2011:1-2.
- [2] Filmore P R, Thomond P. 为什么要重新发明车轮?[J].The Technology International, 2006:100-104.
- [3] 孙酣经.化工新材料[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [4] 李俊,陈晓东,张海,等.采用 ABAQUS 对聚氨酯/橡胶复合轮胎应力场的有限元分析[C]//中国聚氨酯工业协会第十五次年会论文集.上海:中国聚氨酯工业协会,2010:420-423.
- [5] 石亦平,周玉蓉.ABAQUS 有限元分析实例详解[M].北京:机械工业出版社,2006:53-55.
- [6] 王伟,徐忠丽,赵树高,等.载重子午线轮胎接地面有限元分析[J].弹性体,2006,16(1):29-32.

色母粒标准体系建立驶入快车道

色母粒产品种类繁多、应用领域广泛,但一直以来,行业标准建设停步不前。不久前,全国塑料标准化技术委员会及全国塑料制品标准化技术委员会在安徽黄山组织了标准研讨会,色母粒专家委员会的成员对高抗冲聚苯乙烯(PS-HI)色母料等 4 个色母粒品种标准的具体问题进行了研讨,对起草稿提出了建设性意见。目前,这 4 个色母粒品种标准的征求意见稿已经完成,并正式向全行业的企业征求意见,这意味着色母粒行业标准体系的建立驶上了快车道。

这 4 项标准分别是:《高抗冲聚苯乙烯(PS-HI)色母料》和《聚丙烯(PP)色母料》,由宁波色母粒有限公司和北京化工大学合作起草;《聚苯乙烯(PS)片材混配专用色母粒》和《冷热水用聚丙烯(PP-R)管材专用色母粒》,由浙江七色鹿色母粒有限公司和北京化工大学合作起草。

中国染料工业协会色母粒专业委员会秘书长乔辉认为,行业标准的建立是引领行业进步、规范行业行为、保护行业利益的有效手段。而长期以来,标准缺失一直是色母粒行业健康发展的软肋。

据了解,1992 年,聚乙烯着色母料标准实施后,直至 2008 年,聚丙烯纤维用色母料标准、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)色母料标准才实施,间隔了 16 年之久。直至 2008 年,色母粒行业才认识到制定行业标准的重要性,一些知名企业开始了色母粒标准的制定工作。但是,由于色母粒是介于原料与制品之间的半成品,它的归属与分类问题又引起了塑料与塑料制品两大行业的争端。经过了长达 3 年的磨合,今年这一分类与归属问题终于得到妥善解决,4 项标准被列入工业和信息化部行业标准制定计划。

同时,为了更好地引领行业进步,同时也为了配合色母粒标准的评审,色母粒专委会今年发起成立了色母粒专家委员会,首批 11 位专家大都来自国内著名色母粒企业。色母粒行业标准制定工作在经过了 3 年的原地踏步后终于又开始前行。

上海泰金色母粒有限公司总经理陈信华说,色母粒行业如果能够建立起完善的标准体系,行业整体发展质量将会提高一大截,色母粒企业的竞争力也会显著增强。

(中国色母粒网)