

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.05.010

聚氨酯支撑结构免充气轮胎仿真模拟与优化

王文峰, 雍占福, 王裕成, 黄兆阁

(青岛科技大学, 山东青岛 266042)

摘要: 基于 ABAQUS 软件, 建立聚氨酯支撑结构的免充气轮胎模型。分析发现, 免充气轮胎由于胎面弧度较小, 胎面较薄, 导致胎面部位应力过渡不良, 轮胎产生的接地压力较大, 接地压力分布较窄, 接地面积较小, 接地性能较差; 聚氨酯支撑结构产生应力集中, 易产生疲劳损坏。对免充气轮胎进行优化, 增大胎面弧度, 即增加胎面厚度。优化后的免充气轮胎 B 和免充气轮胎 C, 其接地压力分布均匀, 最大接地压力分别减小 20.84% 和 26.85%; 轮胎的接地面积分别增加 18.65% 和 34.94%, 使得接地性能明显提高; 支撑结构的最大应力分别减小 16.8% 和 13.53%, 表现为应力集中现象减弱。优化后的免充气轮胎综合性能提高较大。

关键词: 免充气轮胎; 聚氨酯支撑结构; 有限元分析; 接地压力; 应力分布

中图分类号: TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)05-0048-05

Simulation and Optimization of Non-pneumatic Tire with Polyurethane Support Structure

Wang Wenfeng, Yong Zhanfu, Wang Yucheng, Huang Zhaohe
(Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract : Based on the ABAQUS software, the non-pneumatic tire with polyurethane support structure was established. The results show that the tread curvature is smaller and tread is thinner, resulting in poor stress transfer in tread area. The grounding pressure of tire is bigger, the distribution of grounding pressure is narrow, the grounding area is smaller and the performance of grounding is worse. The stress concentration is produced in the polyurethane support structure which it is easy to produce fatigue damage. The non-pneumatic tire is optimized by increasing tread curvature and tread thickness. For the optimized non-pneumatic tires B and tires C, the ground pressure distribution is uniform, the maximum ground pressure is reduced by 20.84% and 26.85% respectively, the grounding area is increased, the ground contact area is increased by 18.65% and 34.94%, and the grounding performance is improved. For support structure, the stress is decreased, the maximum stress is decreased by 16.8% and 13.53% respectively and stress concentration is weakened. The comprehensive performance of the non-pneumatic tire is improved after the optimization.

Keywords : non-pneumatic tire ; polyurethane support structure ; finite element analysis ; grounding pressure ; stress distribution

免充气轮胎采用免充气结构, 完全打破了传统充气轮胎的设计制造理念, 具有免充气、防爆、安全、耐用、经济、易加工成型等传统充气轮胎不能比拟的优点, 并且不存在爆胎等安全问题, 提高了车辆行驶的安全性^[1], 具有广阔的市场和发展前景。目前各大轮胎公司相继推出了具有各自特色的免充气轮胎, 如米其林的 TWEEL 轮胎、普利司通的全新概念轮胎、韩泰的 i-Flex 免充气轮胎、固特异的弹簧轮胎、优科豪马的新型免充气轮胎等^[2-5]。

聚氨酯弹性体既具有橡胶材料的高弹性, 又具有塑料材料的高强度, 综合性能优异, 具有耐磨、阻燃特性、高耐切割、耐油耐化学药品、使用寿命长、生产工艺简单、绿色环保等众多特点^[6-9], 是制造轮胎的理想材料。

笔者基于 ABAQUS 软件, 建立了 14 × 2.5 规格聚氨酯支撑结构免充气电动摩托车轮胎模型, 免充气轮胎由胎面、聚合物层、聚氨酯支撑结构和胎踵四部分组成, 在轮胎周向上均匀分布有 44 个 C 形的

基金项目: 国家自然科学基金项目 (508772060)

通讯作者: 黄兆阁, 副教授, 主要从事高性能复合材料的研发 E-mail: huangzhaohe1968@163.com

收稿日期: 2018-02-28

引用格式: 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.

Wang Wenfeng, Yong Zhanfu, Wang Yucheng, et al. Simulation and optimization of non-pneumatic tire with polyurethane support structure[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(5): 48-51.

孔洞,聚合物层嵌入到胎面结构中,免充气轮胎的有限元模型图如图1所示。在静态载荷下进行有限元分析,模拟免充气轮胎的受力情况,并根据模拟结果进行胎面优化,以求得到性能更优的免充气轮胎。



图1 免充气轮胎有限元模型

1 免充气轮胎模型的建立

免充气轮胎优化前后示意图如图2所示,聚合物层在轮胎中的相对位置见图2,聚合物层宽度为胎面宽度的80%。对优化前的免充气轮胎(方案A)进行有限元分析后发现,免充气轮胎产生的接地压力较大、接地压力分布较窄;支撑结构产生应力集中,应力较大。为了提高轮胎的接地性能,降低支撑结构应力,对免充气轮胎进行优化。



图2 免充气轮胎草图

优化前的免充气轮胎胎面弧度较小,胎面部位胶料较少,导致轮胎接地区域较小,胎面应力过渡不良,轮胎的操控性较差。故对胎面进行优化,优化方案如表1所示,优化后的轮胎为方案B和方案C,优化方案增加胎面厚度D(即增大胎面弧度和增多胎面部位的胶料),从而增大了胎面接地区域。

表1 免充气轮胎优化方案

项目	方案		
	A	B	C
厚度 D/mm	0	5	8

1.1 材料模型

建立免充气轮胎各部分结构和路面的有限元模型。胎面和胎踵采用超弹性橡胶材料,支撑结构采用聚氨酯材料,采用Ogden模型^[10]对橡胶材料和聚氨酯材料进行描述,聚合物层采用一种韧性材料,具有一定的强度和弹性。

1.2 单元类型

将胎面、支撑结构、聚合物层和胎踵设为可变

形体、路面为解析刚体。使用扫掠网格划分技术中的进阶算法,采用C3D20H单元划分胎面、支撑结构和胎踵;聚合物层采用Surface类型,用SFM3D4单元划分,得到较为均匀、质量较高的网格单元。

1.3 载荷条件

根据作用力与反作用力大小相等方向相反的原理,在路面上施加大小相同、方向向上的力,等效代替轮胎实际承载情况^[11],在路面上施加100 kg径向向上的集中力,模拟单个免充气轮胎装配轮辋后载重两人时的状态。

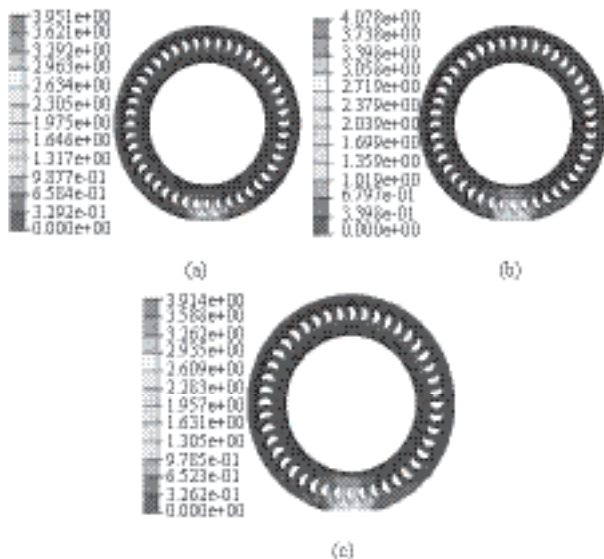
1.4 接触和边界条件

研究需考虑胎面与路面、聚合物层与胎面、胎面与支撑结构、支撑结构与胎踵接触情况及轮胎边界条件。胎面与轮胎接触问题采用罚函数^[12-13]求解,摩擦系数设为0.3;聚合物层采用rebar方式^[14-16],将聚合物层嵌入到胎面结构中去;胎面和支撑结构以及支撑结构和胎踵采用绑定约束,从而使轮胎成为一个整体;约束胎踵的所有自由度,模拟轮辋固定不动,保证轮胎只有径向上的移动。

2 结果与讨论

2.1 轮胎承载分析

图3为三种免充气轮胎的形变云图。



a—轮胎A; b—轮胎B; c—轮胎C

图3 轮胎形变

从图3中可以看出,在静态载荷下,接地区域附近的聚氨酯支撑结构和橡胶胎面产生变形,轮胎A的最大下沉量为3.951 mm,轮胎B为4.078 mm,轮胎C为3.914 mm。图4为垂直方向上免充气轮胎的刚度分布曲线,径向刚度与轮胎的承载能力和舒适性相关,随着载荷的增加,轮胎下沉量不断增

大,呈非线性关系。轮胎C径向刚度最大,轮胎B径向刚度最小,轮胎A径向刚度大小介于两者之间。结合图3和图4可知,三种免充气轮胎可以有效地承担起较大的载荷并提供了一定的舒适性。

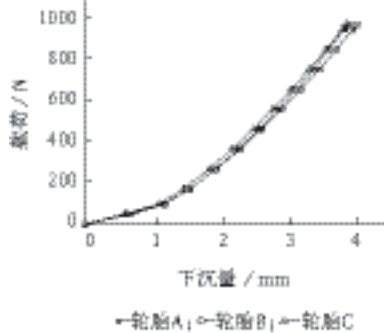


图4 轮胎刚度曲线

2.2 轮胎接地性能分析

表2为三种免充气轮胎的接地模拟相关结果,优化前的免充气轮胎的最大接地压力为1.499 MPa,纵向接地长度为66.56 mm,横向接地长度为22.85 mm。优化后的免充气轮胎与优化前的轮胎相比:最大接地压力轮胎B减小20.84%,轮胎C减小26.85%;纵向接地长度轮胎B减小2.36%、轮胎C减小6.23%;横向接地宽度轮胎B增大17.29%、轮胎C增大38.99%;接地面积轮胎B增大18.65%、轮胎C增大34.94%。综合比较,优化后的免充气轮胎接地性能明显变优。

表2 轮胎模拟结果

项目	方案		
	A	B	C
最大接地压力 / MPa	1.449	1.147	1.06
纵向接地长度 / mm	66.56	64.99	62.41
横向接地宽度 / mm	22.85	26.8	31.76
接地面积 / mm ²	1083.6	1285.7	1462.2

图5为三种免充气轮胎的接地压力分布云图,三种轮胎接地压力均沿胎面纵向分布,中间压力最大并向四周逐渐减小,轮胎A、B和C接地形状近似椭圆形。图6为三种免充气轮胎接地断面处横向方向上的接地压力分布曲线,与图5中的分布情况相同,胎面中心接地压力最大,向两侧逐渐减小。

结合表2、图5和图6,优化前的免充气轮胎最大接地压力较大,接地压力分布不均匀,接地区域较窄,接地面积小,接地性能较差。优化后的免充气轮胎的胎面区域橡胶材料增多(胎面过渡区域增多,应力过渡变好),胎面弧度变大,接地压力减小,最大接地压力减小20%以上,接地压力分布变均匀,在纵向接地长度减小较小的情况下较大幅度的增加

了轮胎接地宽度,轮胎接地面积增加18.5%以上,从而提高了免充气轮胎的稳定性、可操控性和抗偏耐性。轮胎B和C相比,轮胎C的接地性能更优。

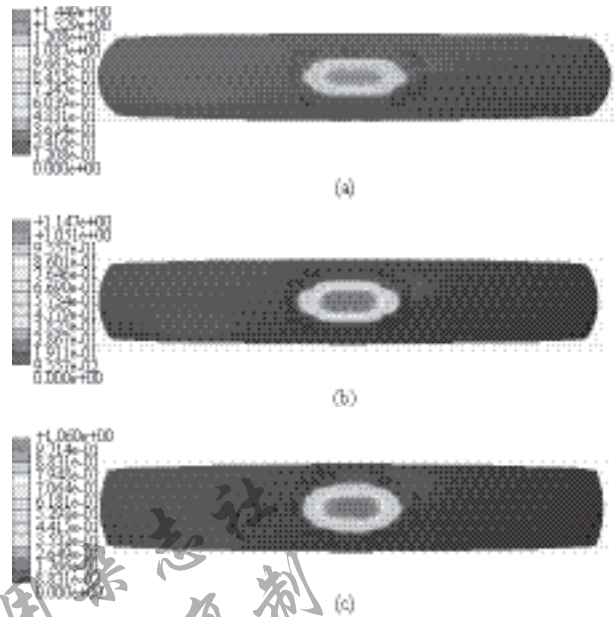


图5 轮胎接地压力分布

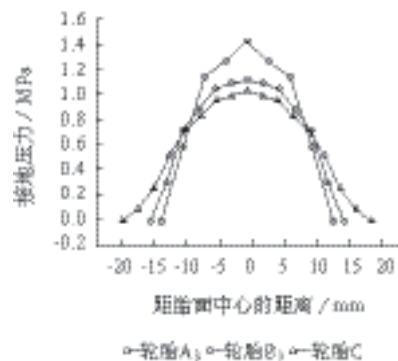
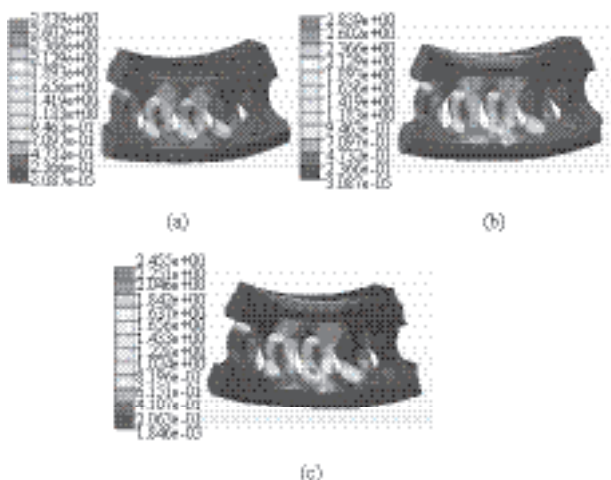


图6 轮胎接地压力分布曲线

2.3 聚氨酯支撑结构应力分析

图7为在静态载荷下,接地处三种免充气轮胎聚氨酯支撑结构的应力分布云图,免充气轮胎产生的最大应力均位于聚氨酯支撑结构与胎面结构接触部位的底部,说明聚氨酯支撑结构是免充气轮胎的主要受力部件,结合图3可知,免充气轮胎承受载荷时,聚氨酯支撑结构产生变形,提供一定的舒适性,并分散、承担轮胎载荷。轮胎A产生的最大应力为2.839 MPa,轮胎B的最大应力为2.362 MPa,轮胎C的最大应力为2.455 MPa。优化前的免充气轮胎产生的最大应力较大,在聚氨酯支撑结构靠近胎面处产生应力集中现象,对支撑结构产生不利的影响。与优化前的免充气轮胎相比,优化后的轮胎B最大



a—轮胎 A ; b—轮胎 B ; c—轮胎 C

图7 支撑结构应力分布

应力减小 16.8%, 轮胎 C 的最大应力减小 13.53%。

图 8 为沿聚氨酯支撑结构宽度方向上应力集中处的应力分布曲线, 三种轮胎支撑结构的应力曲线分布趋势基本相同, 在支撑结构中间处应力最大, 向两侧逐渐减小。综合图 7 和图 8, 优化后的免充气轮胎 B 和 C 的支撑结构处应力明显减小, 分布变均匀, 应力集中现象明显减弱, 降低了支撑结构损坏的可能性, 即提高了聚氨酯支撑结构的使用寿命。

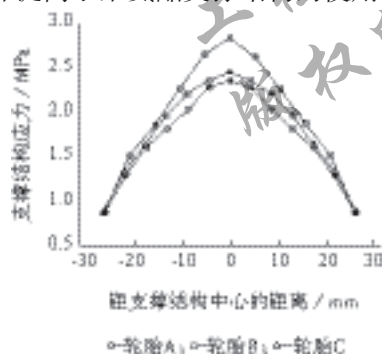


图8 支撑结构应力分布曲线

3 结论

(1) 聚氨酯支撑结构免充气轮胎接地压力沿纵向分布, 接地形状接近椭圆形。优化后的免充气轮胎接地压力减小, 接地区域增加, 接地压力分布均匀, 接地性能提高, 轮胎的操控性能提升。

(2) 聚氨酯支撑结构产生的最大应力位于支撑结构靠近胎面处, 优化前支撑结构产生的应力较大, 产生应力集中, 使支撑结构易产生疲劳损坏; 优化后支撑结构应力减小, 应力分布均匀, 提高了支撑结构的使用寿命。

(3) 聚氨酯支撑结构是免充气轮胎主要的受力部件, 轮胎载重时, 支撑结构产生变形, 分散和承担

载荷, 并提供一定的舒适性。

(4) 免充气轮胎优化后, 胎面部橡胶材料增多, 应力过渡区域增加, 有利于胎面应力的分散, 优化后的免充气轮胎综合性能更优。

参考文献

- [1] 戚丽丽, 王展旭, 高振明, 等. 基于 ANSYS Workbench 的蜂巢轮胎有限元分析 [J]. 塑料工业, 2017, 45(7):53-56.
Qi Lili, Wang Zhanxu, Gao Zhenming, et al. Finite element analysis of honeycomb tire based on ANSYS workbench[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(7):53-56.
- [2] Rhyne, T.B., Cron, S.M. Development of a non-pneumatic wheel[J]. Tire Science and Technology, 2006, 34(3):150-169.
- [3] Anand S K, Ramarathnam K K. Force and moment characteristics of a rhombi tessellated non-pneumatic tire[J]. Tire Science and Technology, 2016, 44(2):130-148.
- [4] 徐立. 新型免充气轮胎发展现状 [J]. 轮胎工业, 2015, 33(11):643-653.
Xu Li. Development of new non-pneumatic tires [J]. Tire Industry, 2015, 33(11):643-653.
- [5] Paul R F, Pete T. Why reinvent the wheel? Bringing innovation to the world of tires[J]. Tire Technological international, 2006:100-104.
- [6] Nandhu S, Jayan A K, Ahmed J S, et al. Analysis of polyurethane filled solid tire[J]. Advanced Materials Research, 2014:464-468.
- [7] Ryu S, Ju J, Kim D, et al. Lateral stiffness and dynamic properties of separable polyurethane tires for a folding bike[C] // Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2012:511-516.
- [8] 黄龙. 聚氨酯轮胎与橡胶轮胎的对比研究 [J]. 橡塑技术与装备 (塑料), 2016, 42:11-12.
Huang Long. Comparative study of polyurethane tire and rubber tire[J]. China Rubber / Plastics Technology and Equipment(Plastics), 2016, 42:11-12.
- [9] 王若云, 贺建芸, 丁玉梅, 等. 蜂巢式塑料轮胎力学性能研究 [J]. 工程塑料应用, 2014, 42(9):42-45.
Wang Ruoyun, He Jianyun, Ding Yumei, et al. Research on the mechanic performance of honeycomb plastic tire[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(9):42-45.
- [10] Ogden R W. On the deformation of solid and tubular cylinders of incompressible isotropic elastic material[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1972, 20(2):77-90.
- [11] 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.
Li Wenbo, Feng Linge, Zhao Changsong, et al. Finite element analysis of static ground contact for TBR tire[J]. China Rubber Industry, 2013, 60(6):338-343.
- [12] 赵鹏, 杨卫民. 胎体结构对塑料轮胎性能影响的仿真研究及结构优化 [J]. 工程塑料应用, 2012, 40(11):34-37.

- theory[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42: 6122-6140.
- [2] Iannucci L. Progressive failure modelling of woven carbon composite under impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32: 1013-1043.
- [3] Hochard C, Payan J, Montagnier O. Design and computation of laminated composite structures[J]. Composites Science and Technology, 2005, 65: 467-474.
- [4] Lehr H F, Lach E, Wiese U, et al. On the application of fiber-reinforced materials of low density in construction elements subjected to high loads[J]. J. Phys IV France 7, 1997, C3-553 ~ C3-559.
- [5] Anand B D. Characterization of CFRP and GFRP composite materials at high strain rate tensile loading[D]. Wichita State University, India, 2002.
- [6] Hallet S R, Ruiz C, Harding J. The effect of strain rate on the interlaminar shear strength of a carbon / epoxy cross-ply laminate: comparison between experiment and numerical prediction[J]. Compos Sci Technol, 1999, 59: 749-758.
- [7] Boutte B, Cazeneuve C, Oytanta C. Effect of strain rate on interlaminar shear properties of carbon / epoxy composites[J]. Compos. Sci. Technol., 1992, 45: 313-321.
- [8] Paris F A. Study of failure criteria of fibrous composite materials[R]. NASA / CR, 2001: 2001-210661: 30-57.
- [9] 催维成. 复合材料结构破坏过程的计算机模拟 [J]. 复合材料学报, 1996, 13(4): 102-111.
- Cui Weicheng. Computational simulation of progressive failure in composite structures[J]. Acta Metallurgica Sinica (English letters), 1996, 13(4): 102-111.
- [10] Chang F K, Chang K Y. Post-failure analysis of bolted composite joints in tension or shear-out mode failure[J]. J. of Composite Materials, 1987, 21: 809-833.
- [11] Chang F K, Chang K Y. A progressive damage model for laminated composites containing stress concentration[J]. J. of Composite Materials, 1987, 21: 834-855.

科思创携手 Polymaker 推出 3D 打印新平台

材料制造商科思创及其合作伙伴 Polymaker 今天正式推出全新网站 3D PC, 旨在推广聚碳酸酯 (PC) 这一兼具优异力学性能和加工性能的工程塑料在 3D 打印领域的应用。该信息平台提供一系列与 PC 3D 打印相关的专业知识, 例如材料选择和打印条件, 为实现 3D 打印部件的批量生产提供必要信息。

PC 这一工程塑料已广泛应用于汽车、医疗保健和航空航天等行业, 而过去五年 3D 打印技术的快速发展为该聚合物开辟了新的潜在应用领域。3D 打印可以创造传统加工技术无法实现的几何形状, PC 的力学特性可以为这些形状带来功能性。3D PC 展示的先进打印和加工技术将帮助 PC 实现在更多全新行业和领域的应用。

随着 3D 打印行业向更专业的应用端发展, 打印机制造商开始针对特定应用领域进行专项开发, 同时, 材料开发也

正朝着类似的方向发展。打印机制造商和材料制造商共同致力于为工业用户所要求的可靠性和可重复性创造完美条件。具体的数据和工艺知识可以提高打印部件的精度、强度和打印速度, 从而为 PC 3D 打印应用到主流制造业创造条件。在这一背景下, 3D PC 这一信息平台应运而生。

越来越多的行业正将 3D 打印技术应用于研发和生产。3D PC 通过展示一系列案例分析和应用, 帮助用户更深入地了解 PC 在 3D 打印领域的应用。其中一个案例介绍了专为航空航天行业设计开发的防火等级 (UL-94, V-0) PC 材料。针对防火级 PC 在具体应用领域的研发, 将为该材料在所有对安全和防火等级有要求的行业的应用提供基础。

PC 天然透明且具有高耐热性, 也是照明应用领域前所未有的理想之选。结合其高冲击强度和广泛可用性, 该材料也是实现 3D 打印规模生产的绝佳材料——3D PC 将告诉用户正确的打开方式。 (中塑在线)

(上接第 51 页)

- Zhao Peng, Yang Weimin. Influence of plastic tire body structure on its performance and structure optimization[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(11): 34-37.
- [13] 刘肖英, 何雪涛, 邓世涛, 等. 蜂窝密度对蜂窝塑料轮胎性能的影响 [J]. 塑料, 2014, 43(6): 97-100.
- Liu Xiaoying, He Xuetao, Deng Shitao, et al. Influence of cellular density on performance of honeycomb tire[J]. Plastics, 2014, 43(6): 97-100.
- [14] Behroozi M, Olatunbosun O A, Ding W. Finite element analysis of aircraft tyre—Effect of model complexity on tyre performance characteristics[J]. Materials and Design, 2012, 35: 810-819.
- [15] Hernandez J A, Al-Qadi I L, Ozer H. Baseline rolling resistance for tires' on-road fuel efficiency using finite element modeling[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 18(5): 424-432.
- [16] Li Hao, Christian S. Analysis of soil compaction and tire mobility with finite element method[J]. Institution of Mechanical Engineers, 2013, 227(3): 275-291.