

应用理论

带束层角度与经线密度对轿车子午线轮胎动态性能的影响

翟明荣^{1,2}, 宋美芹^{1,2}, 于成龙^{1,2}, 庄磊^{1,2}, 甄强^{1,2}, 徐超¹

(1. 双星集团有限责任公司, 山东 青岛 266400; 2. 青岛轮云设计研究院有限责任公司, 山东 青岛 266400)

摘要:在有限元仿真结果与试验结果具有较高相关性的前提下,采用单一变量法,探究轿车子午线轮胎(简称轮胎)的带束层角度与经线密度对其稳态滚动阻力(简称滚动阻力)和侧偏特性的影响。结果表明:与带束层经线密度相比,带束层角度变化更能影响轮胎的动态性能;带束层角度变化对轮胎的侧偏刚性和回正刚性影响较大,对滚动阻力影响较小;轮胎的动态性能随带束层角度与经线密度的变化与轮胎的规格相关。

关键词:轿车子午线轮胎;带束层角度;带束层经线密度;动态性能;有限元仿真

中图分类号: TQ336.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2024)03-0191-06

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2024.03.0191



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

子午线轮胎的耐磨性能、滚动阻力、操纵稳定性和乘坐舒适性等都与其带束层密切相关^[1-2]。其中,轮胎的滚动阻力是汽车的燃油经济性的重要参考因素之一,在配套轮胎的开发中,轮胎企业经常需要按照主机厂的要求进行各种降低轮胎的滚动阻力的探索。因此,了解轮胎的滚动阻力影响规律相当重要^[3]。

侧偏特性是轮胎的动态性能的重要组成部分,其中侧向力、回正力矩和侧偏角度是影响车辆操纵稳定性的基本因素。轮胎滚动中车辆方向盘处于正中位置时,由于带束层帘布角度效应(简称角度效应)的存在会产生固有残余回正力矩;当轮胎的侧向力为零时,所对应的侧偏角度不为零,此时侧偏角度所对应的回正力矩称为角度效应的残余回正力矩(PRAT)^[4]。PRAT是评价车辆的行驶稳定性、安全性及舒适性的重要指标之一。角度效应对汽车的操控性影响很大,但又不能像其他径向力变量、侧向力变量、锥度一样可以从工艺上

消除,只能从带束层和胎体的设计上进行控制^[5]。

目前,带束层结构对轮胎性能的影响已得到一定的研究^[6],但带束层结构变化对轮胎的动态性能影响的研究多以单一规格轮胎为主。王清逸^[7]以225/50R17轮胎为例,提出带束层结构主要影响轮胎的侧偏刚度,是影响整车的操纵稳定性的主要因素。屈灿明等^[2]研究了205/55R16轮胎的带束层角度和骨架材料强度变化对轿车子午线轮胎滚动阻力的影响。孙晓峰等^[8]研究了205/55R16轮胎的结构参数对六分力中侧偏刚度和回正刚度的影响。秦艳分等^[9]探究了带束层角度和三角胶高度对半钢子午线轮胎侧偏特性的影响。

本工作以名义断面宽为185~265 mm、扁平率为55和65、轮辋直径为381.0~431.8 mm(15~17英寸)的6个规格轿车子午线轮胎(以下简称轮胎)为研究对象,在确保仿真精度的前提下,通过单一变量法探究带束层角度与经线密度对轮胎稳态滚动阻力(以下简称滚动阻力)及侧偏特性的影响。

作者简介: 翟明荣(1988—),女,山东青岛人,双星集团有限责任公司和青岛轮云设计研究院有限责任公司工程师,硕士,主要从事轮胎性能仿真相关工作。

E-mail: zmingrong@doublestar.com.cn

引用本文: 翟明荣,宋美芹,于成龙,等.带束层角度与经线密度对轿车子午线轮胎动态性能的影响[J].橡胶工业,2024,71(3):191-196.

Citation: ZHAI Mingrong, SONG Meiqin, YU Chenglong, et al. Influence of belt angle and warp density on dynamic performance of passenger car radial tire[J]. China Rubber Industry, 2024, 71(3): 191-196.

1 有限元仿真

1.1 有限元模型的建立

本工作采用的6种轮胎的基本信息如表1所示,具体结构建模及材料建模参考前期相关文献^[10-14],6种轮胎的有限元模型如图1所示。

表1 6种轮胎的基本信息

Tab. 1 Basic informations of 6 types of tires

轮胎编号	规格	花纹
轮胎1	205/55R16	DH08C
轮胎2	215/55R17	DS01
轮胎3	225/55R16	DLA01
轮胎4	185/65R15	DH05
轮胎5	225/65R17	DS03
轮胎6	265/65R17	W01

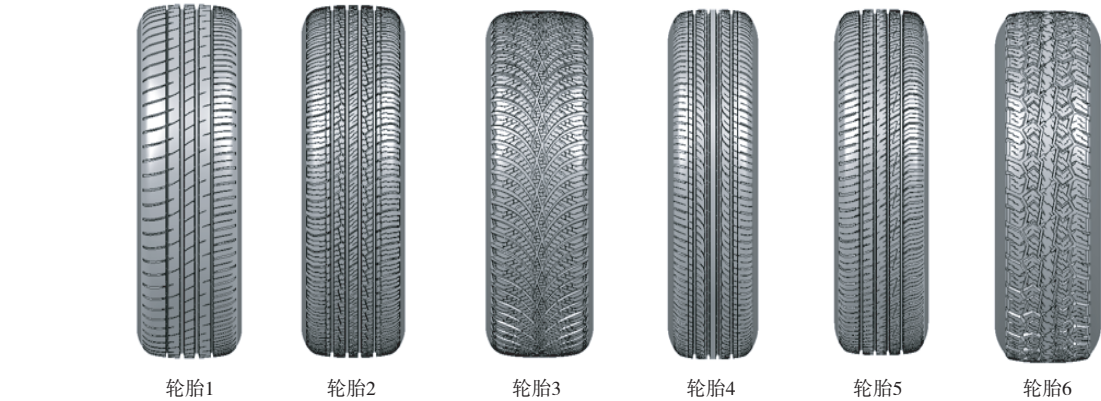


图1 6种轮胎的有限元模型
Fig. 1 Finite element models of 6 types of tires

胎滚动阻力、PRAT、侧偏刚度等性能的影响,均采用单一变量法,在原始轮胎设计方案(简称参考方案)的基础上分别制定如下仿真方案。

根据既要考虑带束层对胎体的箍紧作用,又要便于加工的原则,带束层角度共设计5个方案,各方案带束层角度依次为24°,27°,28°,29°和30°,其中24°为参考方案。

在考虑带束层强度以及钢丝帘线附着力和覆胶量的前提下,带束层经线密度共设计5个方案,其中带束层经线密度为100%的设计方案为参考方案,其他4个方案的经线密度依次为参考方案的80%,90%,110%和120%。

为了便于观察带束层角度与经线密度变化对轮胎动态性能的影响,后续带束层数据处理过程

1.2 测试方法及仿真方案的设定

1.2.1 测试方法

仿真与试验测试方法相同。滚动阻力按照ISO 28580—2018在德国ZF公司生产的滚动阻力试验机上进行测试。PRAT、侧偏刚度和回正刚度按照GMW 15206—2007在美国史密斯实验室MTS Flat Trac SS实验台上进行测试,其中PRAT的测试条件为:环境温度 21℃,充气压力 228 kPa,负荷 70%标准负荷,行驶速度 3.6 km·h⁻¹,侧偏角度 -1°~1°;为了提高计算机计算效率,PRAT仿真中轮胎的速度设定为60 km·h⁻¹。

1.2.2 仿真方案的设定

为了更准确反映带束层角度与经线密度对轮

均采用设计方案与参考方案差值处理的方法进行分析。

2 结果与讨论

2.1 轮胎的滚动阻力分析

2.1.1 仿真结果与试验结果的一致性对比

ISO 28580—2018中将轮胎的滚动阻力定义为每单位行驶距离的能量损失(或能量消耗),等效于单位为N的力,计算公式如下:

$$R=U''/(2\pi r_e)$$

(1)

式中:R为轮胎的滚动阻力,N;U''为轮胎滚动一周耗散的能量,N·m⁻¹;r_e为轮胎的自由滚动半径,m。

轮胎的滚动阻力仿真值与试验值的相关性如图2所示。

从图2可以看出,轮胎的滚动阻力仿真值与试

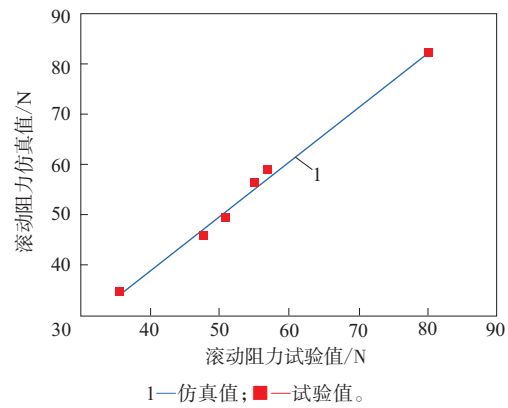
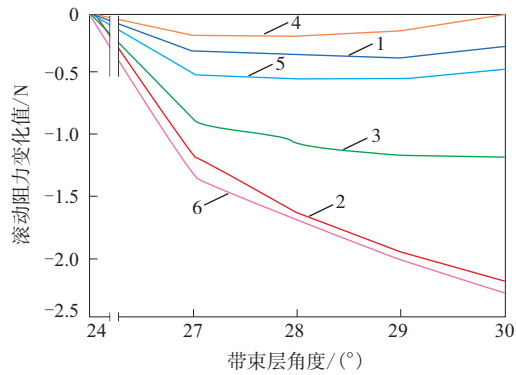


图2 轮胎的滚动阻力仿真值与试验值的相关性
Fig. 2 Correlation between simulation values and test values of tire rolling resistance

验值具有较高的相关性。

2.1.2 带束层角度与经线密度对轮胎滚动阻力的影响

轮胎的滚动阻力随带束层角度的变化曲线如图3所示。



1—轮胎1; 2—轮胎2; 3—轮胎3; 4—轮胎4; 5—轮胎5; 6—轮胎6。

图3 轮胎的滚动阻力随带束层角度的变化曲线
Fig. 3 Variation curves of tire rolling resistance with belt angles

从图3可以看出：轮胎的滚动阻力随带束层角度的增大呈下降趋势；在轮胎的扁平率及轮辋的着合直径相同的条件下，轮胎的断面宽越大，随着带束层角度的增大，轮胎的滚动阻力降低幅度增大；增大轮胎的外直径有利于降低其滚动阻力。

带束层角度与经线密度对轮胎滚动阻力及滚动半径的影响如表2所示。

从表2可以看出：当带束层角度从24°增大到30°时，轮胎的滚动阻力最大降低2.3 N；与带束层经线密度相比，带束层角度变化对轮胎的滚动阻

表2 带束层角度与经线密度对轮胎滚动阻力及滚动半径的影响

Tab. 2 Influence of belt angles and warp densities on rolling resistances and rolling radius of tires

轮胎 编号	滚动阻力变化值/N		滚动半径变化值/mm	
	带束层角度	带束层经线密度	带束层角度	带束层经线密度
轮胎1	-0.4~0	0~+0.1	0~+2.6	-0.5~+0.2
轮胎2	-2.2~0	-0.1~+0.2	0~+2.9	-0.1~+0.1
轮胎3	-1.2~0	0~+0.1	0~+2.9	-0.2~+0.1
轮胎4	-0.2~0	-0.2~+0.4	0~+2.1	-0.1~0
轮胎5	-0.5~0	0~+0.2	0~+2.7	-0.2~+0.1
轮胎6	-2.3~0	0~+0.2	0~+2.2	0

注：滚动阻力和滚动半径均为带束层变化过程中各工况的最大变化区间。

力及滚动半径的影响更大，这是由于带束层角度增大，帘线间的纵向拉力增大，导致带束层受力后更加偏斜，对胎体的横向约束作用增大，而对胎体的周向约束作用减小，轮胎的滚动半径增大，因此轮胎的滚动阻力降低^[15]。

以215/55R17轮胎为例，轮胎滚动过程中的接地印痕如图4所示。

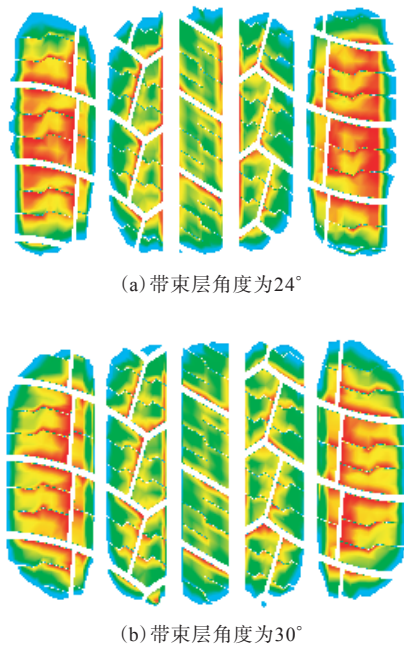


图4 215/55R17轮胎滚动过程中的接地印痕
Fig. 4 Footprints of 215/55R17 tires during rolling process

从图4可以看出，带束层角度增大，轮胎的接地印痕面积增大，此时胎肩部位接地压力及生热降低，胎冠受力减弱，表明增大带束层角度可以协调轮胎的形变，合理分布能量损失，降低轮胎的滚动阻力。

2.2 轮胎的侧偏特性分析

PRAT是影响车辆直线跑偏的关键因素,其正、负号分别代表轮胎左、右跑偏,采用轮胎正、反向滚动时的PRAT平均值表征轮胎的跑偏情况^[16]。

在小侧偏角度的情况下,轮胎的侧向力与侧偏角度近似成比例,其比值称为轮胎的侧偏刚度,主要影响轮胎的侧偏特性,是评估车辆及轮胎的侧偏特性的重要参数之一^[5,17]。回正力矩是用来评估车辆的行驶稳定性的重要参数。在小侧偏角度范围内,侧向力及回正力矩与侧偏角度几乎成线性关系,因此在计算时,取侧偏角度为±0.5°的侧向力平均值作为轮胎的侧偏刚度,取侧偏角度为±0.5°的回正力矩平均值作为轮胎的回正刚度^[18]。

2.2.1 仿真结果与试验结果的一致性对比

对6种轮胎建立侧偏有限元模型,求得相应模型在侧偏工况下的PRAT、侧偏刚度以及回正刚度3个评价指标。轮胎的侧偏特性仿真结果与试验结果如表3所示。

从表3可以看出:轮胎的侧偏刚度及回正刚度仿真与试验结果具有较高的一致性,误差控制在±10%以内;轮胎的PRAT仿真精度略低。这是由于PRAT测试关注的是轮胎的小侧偏角度范围内的特性,相对于轮胎较大的垂直负荷,此时轮胎的侧向力和回正力矩都很小,同时在轮胎的侧偏特性测试时未考虑轮胎与地面接触的力学响应与温度等因素的影响。

2.2.2 带束层角度与经线密度对轮胎侧偏特性的影响

带束层角度与经线密度对轮胎侧偏特性的影响如表4所示,轮胎的侧偏刚度随带束层角度的变化曲线如图5所示。

从表4和图5可以看出:轮胎的PRAT及侧偏刚度变化均随带束层角度的增大而减小,回正刚度变化随带束层角度的增大而增大;与带束层经线密度相比,带束层角度变化对轮胎的侧偏特性影响更大;当带束层角度从24°增大到30°,轮胎的

表3 轮胎的侧偏特性仿真结果与试验结果
Tab.3 Simulation results and test results of cornering characteristics of tires

轮胎编号	PRAT/(N·m)		PRAT误差/%	侧偏刚度/[N·(°) ⁻¹]		侧偏刚度误差/%	回正刚度/[N·m·(°) ⁻¹]		回正刚度误差/%
	仿真值	试验值		仿真值	试验值		仿真值	试验值	
轮胎1	-0.9	-1.0	-11.2	-1 321.5	-1 290.4	+2.4	59.0	53.6	+10.0
轮胎2	-1.8	-2.7	-34.1	-1 548.5	-1 673.1	-7.4	55.3	60.8	-9.0
轮胎3	-1.8	-2.8	-37.1	-1 640.6	-1 771.3	-7.4	62.7	58.6	+7.0
轮胎4	-2.0	-2.6	-25.0	-1 244.3	-1 230.1	+1.2	45.8	43.1	+6.2
轮胎5	-6.2	-6.6	-6.0	-2 261.8	-2 351.8	-3.8	103.2	104.5	-1.2
轮胎6	-1.4	-1.7	-19.2	-1 817.5	-1 790.3	1.5	82.8	84.2	-1.7

表4 带束层角度与经线密度对轮胎侧偏特性的影响
Tab.4 Influence of belt angles and warp densities on cornering characteristics of tires

轮胎编号	PRAT变化值/(N·m)		侧偏刚度变化值/[N·(°) ⁻¹]		回正刚度变化值/[N·m·(°) ⁻¹]	
	带束层角度	带束层经线密度	带束层角度	带束层经线密度	带束层角度	带束层经线密度
轮胎1	-0.1~0	-0.1~0	-183.3~0	-55.8~+71.8	0~+10.6	-2.4~+1.6
轮胎2	-0.6~0	-0.1~0	-66.0~0	-18.2~+18.4	0~+9.9	-0.3~+0.4
轮胎3	-0.2~0	-0.1~0	-134.4~0	-29.9~+30.8	0~+10.5	-1.1~+0.8
轮胎4	-0.8~0	-0.1~0	-151.5~0	-25.5~+25.6	0~+6.9	-0.6~+0.4
轮胎5	-1.2~0	-0.2~0	-337.8~0	-53.8~+66.2	0~+16.4	-1.4~+0.9
轮胎6	-0.3~0	-0.1~0	-175.8~0	-38.7~+39.2	0~+17.1	-0.6~+0.2

注:每种轮胎的变化值为基于参考方案轮胎的最大变化区间,相应带束层角度和经线密度顺序增大。PRAT最大变化为1.2 N·m,侧偏刚度最大变化为337.8 N·(°)⁻¹;随着带束层经线密度的增大,轮胎的PRAT变化较小,侧偏刚度增大,回正刚度减小。因此,带束层角度减小,其周向箍紧作用加强,胎肩着地区域加大,轮胎的侧向抓着力及侧偏刚度也随之增大,此结论与带束层角度增大轮胎变软的结论一致^[19]。

3 结论

(1)与带束层经线密度相比,带束层角度变

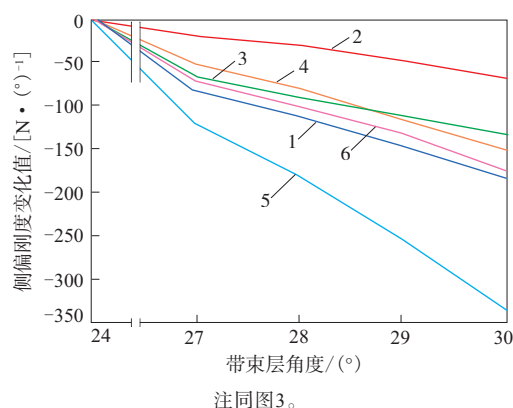


图5 轮胎侧偏刚度随带束层角度的变化曲线
Fig. 5 Variation curves of cornering stiffnesses of tires with belt angles

化对轮胎的动态性能影响更大。

(2) 增大带束层角度可以适当降低轮胎的滚动阻力,但带束层角度与经线密度变化对轮胎的滚动阻力影响较小。

(3) 带束层角度变化对轮胎的侧偏刚性和回正刚性影响较大。

(4) 轮胎的动态性能随带束层角度与经线密度的变化与轮胎的规格相关。

参考文献:

- [1] 冯希金,王传铸,李伟,等.用有限元法研究带束层角度对轿车轮胎性能的影响[J].轮胎工业,2003,23(6):329-336.
FENG X J, WANG C Z, LI W, et al. Studying effect of belt angle on performance of car tire by FEM[J]. Tire Industry, 2003, 23(6): 329-336.
- [2] 屈灿明,甘坚南.轿车子午线轮胎带束层结构对滚动阻力的影响[J].轮胎工业,2018,38(1):29-30.
QU C M, GAN J N. Influence of belt structure on rolling resistance of passenger car radial tire[J]. Tire Industry, 2018, 38(1): 29-30.
- [3] 郗永红.基于试验法和有限元法对轮胎滚动阻力影响因素的研究[D].青岛:青岛理工大学,2018.
CHI Y H. Research on factors influencing tire rolling resistance based on experimental method and finite element method[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.
- [4] 俞旻,杨通,张文清,等.轮胎残余回正力矩测试和计算方法研究[J].轮胎工业,2022,42(3):188-191.
YU M, YANG T, ZHANG W Q, et al. Study on test and calculation methods of tire residual aligning torque[J]. Tire Industry, 2022, 42(3): 188-191.
- [5] 高明,于海涛,周鹏程,等.395/85R20 TRY66轮胎纯侧偏特性仿真与试验对比研究[J].轮胎工业,2013,33(11):655-661.
GAO M, YU H T, ZHOU P C, et al. Simulation and experimental study of pure cornering based on 395/85R20 TRY66 tire[J]. Tire Industry, 2013, 33(11): 655-661.
- [6] LIU Y, ZHANG G, YAN H, et al. Simulation on effect of five kinds of belt structures on tire performance[J]. Key Engineering Materials, 2012, 501: 151-155.
- [7] 王清逸.轮胎结构参数与整车操纵稳定性的研究[D].广州:广东工业大学,2020.
WANG Q Y. Research on tire structural parameters and vehicle handling stability[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.
- [8] 孙晓峰,张凯凯,王龙庆,等.轮胎结构参数对侧偏性能的影响[J].橡胶科技,2020,18(12):682-685.
SUN X F, ZHANG K K, WANG L Q, et al. Effect of structure parameters on cornering characteristics of tire[J]. Rubber Science and Technology, 2020, 18(12): 682-685.
- [9] 秦艳分,张典,宋立,等.半钢子午线轮胎的侧偏特性研究[J].轮胎工业,2022,42(1):20-23.
QIN Y F, ZHANG D, SONG L, et al. Research on cornering properties of steel-belted radial tire[J]. Tire Industry, 2022, 42(1): 20-23.
- [10] 翟明荣,孟照宏,宋美芹,等.基于有限元方法的轮胎残余回正力矩研究[J].轮胎工业,2021,41(7):414-418.
ZHAI M R, MENG Z H, SONG M Q, et al. Study on residual aligning torque of tire based on finite element method[J]. Tire Industry, 2021, 41(7): 414-418.
- [11] CHO J C. Simulation-improved prediction of tire cornering force and moment by using nonlinear viscoelasticity and transient thermal analysis through explicit FEM[C]. 7th International Munich Chassis Symposium 2016. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [12] CHO J R, KIM K W, YOO W S, et al. Mesh generation considering detailed tread blocks for reliable 3D tire analysis[J]. Advances in Engineering Software, 2003, 35(2): 105-113.
- [13] RAO K N, KUMAR R K, BOHARA P C. A sensitivity analysis of design attributes and operating conditions on tyre operating temperatures and rolling resistance using finite element analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2006, 220(d5): 501-517.
- [14] YDREFORS L, HJORT M, KHARRAZI S, et al. Rolling resistance and its relation to operating conditions: A literature review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2021, 235(12): 2931-2948.
- [15] ALDHUFAIRI H S, OLATUNBOSUN O A. Developments in tyre design for lower rolling resistance: A state of the art review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2018, 232(14): 1865-1882.
- [16] 孟照宏,史彩霞,翟明荣.轮胎转向残余回正力矩的有限元分析及关键影响因素研究[J].橡胶工业,2021,68(11):822-826.
MENG Z H, SHI C X, ZHAI M R. Finite element analysis of tire PRAT and study on key influencing factors[J]. China Rubber

- Industry, 2021, 68(11): 822-826.
- [17] 缪红燕. 子午线轮胎刚度和侧偏性能的有限元分析[D]. 北京: 北京化工大学, 2000.
- MIAO H Y. Finite element analysis of stiffness and cornering properties of radial tires[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2000.
- [18] 叶树斌. 轮胎设计参数对侧偏特性影响分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- YE S B. Analysis of the influence of tire design parameters on cornering properties[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [19] 王宝凯. 205/55R16子午线轮胎的结构设计、带束层优化与性能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2020.
- WANG B K. Structural design, belt layer optimization and performance study of 205/55R16 radial tire[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2020.
- 收稿日期: 2023-12-05

Influence of Belt Angle and Warp Density on Dynamic Performance of Passenger Car Radial Tire

ZHAI Mingrong^{1,2}, SONG Meiqin^{1,2}, YU Chenglong^{1,2}, ZHUANG Lei^{1,2}, ZHEN Qiang^{1,2}, XU Chao¹

(1. Doublestar Group Co., Ltd, Qingdao 266400, China; 2. Qingdao Lunyun Design and Research Institute Co., Ltd, Qingdao 266400, China)

Abstract: Under the premise of high correlation between finite element simulation results and experimental results, the single variable method was used to explore the influence of belt angle and warp density on the steady-state rolling resistance (referred to as rolling resistance) and cornering characteristics of passenger car radial tire (referred to as the tire). The results showed that compared to the belt warp density, the belt angle variation had a greater impact on the dynamic performance of the tire. The belt angle variation had a significant impact on the cornering stiffness and return stiffness of the tire, but had a smaller impact on the rolling resistance. The above changes in the dynamic performance of the tire were related to its specification.

Key words: passenger car radial tire; belt angle; belt warp density; dynamic performance; finite element simulation

专利2则

由吉林电子信息职业技术学院申请的专利(公布号 CN 117247611A, 公布日期 2023-12-19)“基于玉米副产物的环保型橡胶材料及其制备方法”, 公开了基于玉米副产物的环保型橡胶材料及其制备方法。将100份橡胶、20~40份改性白炭黑、8~12份木质素、1~3份硬脂酸、3~7份氧化锌、3~5份润滑剂、1~3份硫化剂、0.8~1.2份促进剂、0.02~0.12份引发剂进行混炼, 胶料硫化后得到橡胶材料。本发明引入苯环, 提高了橡胶材料的刚性; 硅烷偶联剂提高了白炭黑的分散性, 增强了白炭黑与橡胶之间的结合能力; 橡胶的碳-碳双键在微量引发剂的作用下与白炭黑表面基团反应, 也增强了橡胶与白炭黑的结合力; 玉米副产物木质素能延缓橡胶材料老化; 玉米副产物润滑剂

能提高橡胶材料的耐热性能、耐磨性能和韧性, 且来源广、成本低、无污染。

由远缆控股集团有限公司申请的专利(公布号 CN 117247645A, 公布日期 2023-12-19)“一种阻燃电缆护套料及其制备方法”, 涉及一种阻燃电缆护套胶料制备方法。阻燃电缆护套胶料配方(用量/份)为: 聚氯乙烯 60~70, 丁苯橡胶 30~40, 氧化锌 1.6~2, 硬脂酸 2~4, 氢氧化铝 8~10, 十溴二苯乙烷 5~7, 聚磷酸铵 7~9, 分散剂 1.5~2.5, 硅烷偶联剂 1~3, 钙锌稳定剂 2.5~5, 紫外线吸收剂 0.5~1.5, 促进剂MBT 1~2, 促进剂MBTS 0.5~1.5。本发明阻燃电缆护套胶料具有提高电缆护套阻燃性

(信息来源于国家知识产权局)