

测试·分析

轮胎结构偏差对接地印痕影响的试验和仿真研究

田旭东¹,周平²,廖发根¹,侯丹丹¹,粟本龙³

[1. 中策橡胶集团有限公司,浙江 杭州 310018;2. 知轮(杭州)科技有限公司,浙江 杭州 310018;3. 哈尔滨工业大学(威海),山东 威海 264209]

摘要:综合利用试验和有限元仿真方法,并引入不对称因子表征轮胎接地印痕的不对称性,研究结构偏差(带束层整体偏移和左右胎肩厚度差异)对轮胎接地印痕的影响。结果表明,结构偏差易造成轮胎接地印痕不对称,其中左右胎肩厚度差异比带束层整体偏移对轮胎接地印痕不对称性的影响更为显著。本研究结果为轮胎生产工艺控制和改善轮胎接地印痕提供了依据。

关键词:轮胎;结构偏差;带束层整体偏移;胎肩厚度差异;接地印痕;不对称性;有限元分析

中图分类号:TQ336.1;O241.82

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2021)10-0774-05

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2021.10.0774



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

轮胎是汽车唯一的接地部件,它提供汽车行驶所需的驱动力、转向力和制动力^[1]。轮胎是橡胶弹性制品,路况、车况、驾驶人员的驾驶习惯及轮胎质量方面的问题均会在一定程度上引起轮胎不规则磨损^[2],因此轮胎不规则磨损是一个综合性问题^[3-4]。仅就轮胎方面而言,接地印痕对轮胎磨损的影响最大^[5]。

轮胎在设计与制造时可能出现一定的结构偏差,主要表现为带束层中心与胎体中心偏移、轮胎左右胎肩厚度不一致等^[6]。这些结构偏差直接影响轮胎接地印痕^[7]。轮胎接地印痕及接地反力分布直接影响轮胎磨损和车辆操纵性、安全性及乘坐舒适性等性能,一直是轮胎和车辆领域研究的重点和热点问题^[8]。

本工作引入不对称因子表征轮胎接地印痕的不对称性,采用试验和有限元仿真两种方法分析结构偏差对轮胎接地印痕的影响规律,以求为轮胎企业生产工艺控制提供一定的理论依据。

1 轮胎接地印痕不对称性表征

理论上,全钢载重子午线轮胎胎冠弧、胎肩花纹、两侧胎肩厚度、接地印痕均为轴向对称,轮胎使用中两侧胎肩磨损程度应一致^[9]。但各轮胎企业在产品试验或成品性能抽检时偶有发现轮胎接地印痕左右不对称的情况,见图1(a)(图中 L_1 和 L_2 分别为轮胎接地印痕区域内左右两边胎肩部位的接地长度, P_1 和 P_2 分别为轮胎接地印痕区域内左右两边胎肩部位的接地反力)。接地印痕不对称直接导致轮胎接地压力分布不均^[10],轮胎使用中两侧胎肩磨损程度不一致,进而导致轮胎不规则磨损,见图1(b)(图中各部位剩余花纹沟深度分别为:内侧肩沟 12.9 mm,内中沟 13.5 mm,外中沟 13.3 mm,外侧肩沟 11 mm)。

Schallamach和Hofstetter认为^[11],轮胎累积磨损量(w)是摩擦力做功而产生的摩擦能(E)的函数,即 $w=f(E)$ 。 E 可按式(1)计算:

$$E=f_1 v_s \quad (1)$$

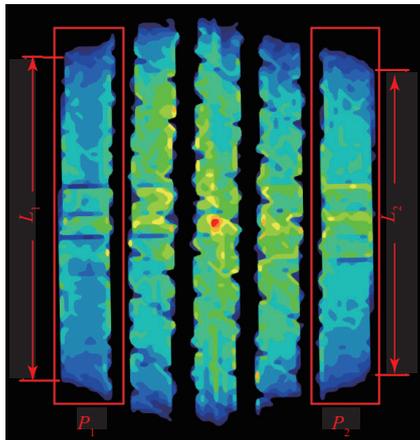
基金项目:国家自然科学基金重大项目专项课题(51790502)

作者简介:田旭东(1987—),男,内蒙古呼伦贝尔人,中策橡胶集团有限公司工程师,学士,主要从事全钢子午线轮胎结构设计和产品研发工作。

E-mail:372965059@qq.com

引用本文:田旭东,周平,廖发根,等.轮胎结构偏差对接地印痕影响的试验和仿真研究[J].橡胶工业,2021,68(10):774-778.

Citation: TIAN Xudong, ZHOU Ping, LIAO Fagen, et al. Experimental and simulation research on influence of tire structural deviation on footprint[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(10): 774-778.



(a) 接地印痕不对称



(b) 不规则磨损

图1 轮胎接地印痕不对称及其导致的不规则磨损
Fig. 1 Asymmetries of tire footprints and irregular wears caused by them

$$f_t = \mu(p, v_s) p \quad (2)$$

式中, f_t 为切向力, v_s 为滑移速度, μ 为摩擦因数, p 为接地压力。此外, 试验结果表明, μ 与 p 的分布和 v_s 有关。可以看出, 轮胎接地反力越大, 磨损速率也越大。

本工作通过定义胎肩接地长度比 L_{co} 和接地压力因数 P_{co} 作为不对称因子, 分别描述轮胎接地印痕的不对称性和接地反力的不对称性, L_{co} 和 P_{co} 越接近于 1, 则接地印痕的对称性越好。其中:

$$L_{co} = L_1 / L_2 \quad (3)$$

$$P_{co} = P_1 / P_2 \quad (4)$$

本研究约定, 不对称因子小于 0.97 或大于 1.03, 可认为轮胎的接地印痕存在显著不对称性。经计算, 图 1 所示轮胎的 L_{co} 为 1.06, P_{co} 为 0.93, 可见该轮胎的接地印痕存在显著不对称性。

2 轮胎接地印痕试验结果

2.1 试验设备

LT-5000 型静态加载试验机, 中国台湾高铁检测仪器有限公司产品; MAP7100 型压力分布系统,

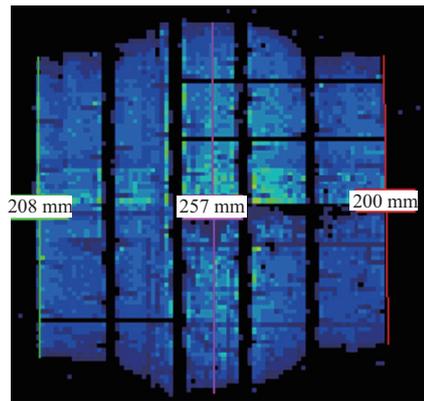
美国 Tekscan 公司产品。

2.2 测试方法

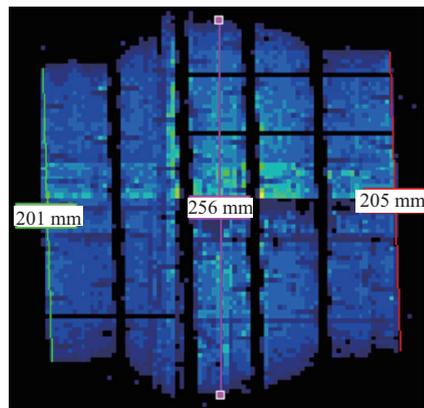
根据 GB/T 22038—2018《汽车轮胎静态接地压力分布试验方法》测试轮胎接地压力, 试验环境温度为 18~36 °C, 湿度为 45%。

将待测轮胎安装在标准规定的测量轮辋上, 按规定充气、停放、再次确认充气压力后, 将轮胎安装在静态加载试验机上, 按照设定的负荷加载至刚性平台(带有传感器的压力毯), 并记录轮胎接地压力分布^[12]。

若测试中发现接地印痕显著不对称, 可通过水平翻转轮胎(上下模位置对调)重复测试。如果轮胎翻转前后 L_{co} 均大于 1 或均小于 1, 则视为测试设备故障, 应排除; 其他情况则为轮胎结构因素导致的不对称。轮胎自身结构因素导致的不对称接地印痕如图 2 所示。



(a) 0° 接地印痕



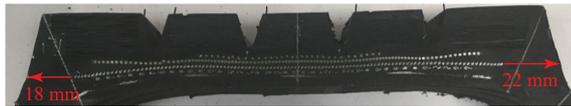
(b) 水平翻转 180° 接地印痕

图2 轮胎自身结构因素导致的不对称接地印痕
Fig. 2 Asymmetric footprints of tire caused by itself structural factors

图2(a)和(b)中 L_{co} 分别为1.04和0.98,即是轮胎自身结构因素导致的接地印痕不对称。

2.3 轮胎结构偏差对接地印痕的影响

根据经验,轮胎结构偏差主要是生产工艺波动造成的^[13],其中常见的对接地印痕影响显著的形式有带束层整体偏移和左右胎肩厚度差异,如图3所示。



(a) 带束层整体偏移



(b) 左右胎肩厚度差异

图3 结构偏差轮胎断面

Fig. 3 Cross-sections of structural deviation tires

带束层整体偏移和两胎肩厚度差异在工艺生产中偶有发生,图3(a)所示为实际生产中遇到的左右胎肩厚度基本相同(45.0 mm/44.8 mm)、带束层整体向一侧偏移2 mm的轮胎断面;图3(b)所示为实际生产中遇到的左右胎肩厚度相差3.2 mm的轮胎断面。

结构偏差轮胎接地印痕和不对称因子分别见图4和表1。

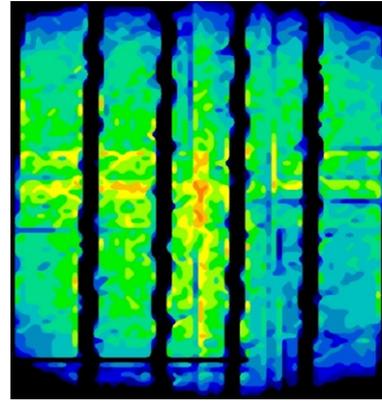
从图4和表1可以看出:带束层整体偏移轮胎接地印痕左右基本对称,不对称因子差值在0.03以内,肩部厚度相同情况下带束层整体偏移对接地印痕对称性影响较小;胎肩厚度差异轮胎接地印痕左右不对称,不对称因子差值大于0.03,说明胎肩厚度差异对接地印痕对称性影响较大。

考虑到以上单因素变量对轮胎实际接地印痕的影响可能存在其他变量干扰,下面采用有限元方法对带束层整体偏移和两胎肩厚度差异两个因素进行建模验证。

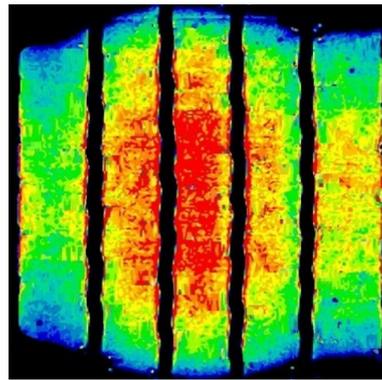
3 轮胎有限元建模及接地印痕表征

3.1 轮胎有限元模型

采用哈尔滨工业大学的tyabas有限元分析软



(a) 带束层整体偏移



(b) 胎肩厚度差异

图4 结构偏差轮胎接地印痕

Fig. 4 Footprints of structural deviation tires

表1 结构偏差轮胎不对称因子对比

Tab. 1 Asymmetry factor comparison of structural deviation tires

不对称因子	带束层整体偏移	胎肩厚度差异
L_{co}	0.99	0.93
P_{co}	1.02	0.94

件,建立如图5所示的带束层整体偏移和胎肩厚度差异轮胎二维有限元模型^[14]。在Abaqus软件中,将二维有限元模型旋转,并建立刚体路面,生成三维有限元模型。对刚体路面施加竖直负荷,得到接地印痕及接地压力分布^[15-19]。

3.2 结构偏差轮胎接地印痕模拟

分别对4层带束层整体偏移2 mm、两侧胎肩厚度均为45 mm的轮胎有限元模型和胎肩厚度相差3 mm的轮胎有限元模型进行分析,接地印痕和不对称因子分别见图6和表2。

由图6和表2可见,针对各单因素变量有限元

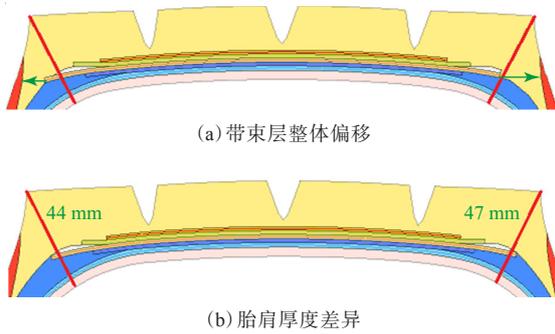


图5 结构偏差轮胎有限元模型

Fig. 5 Finite element models of structural deviation tires

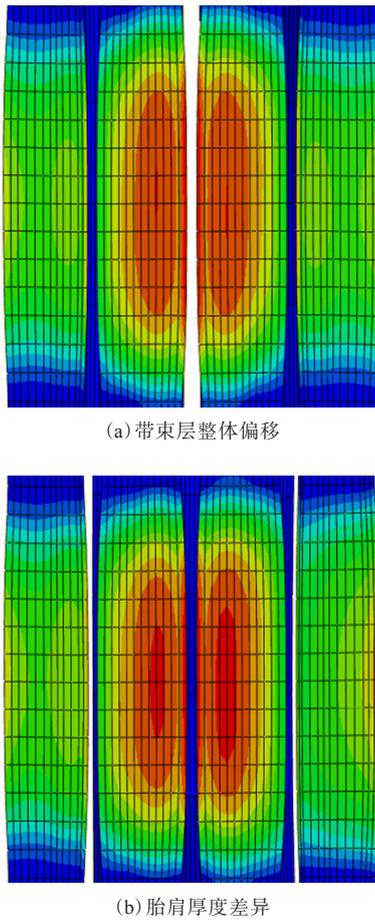


图6 结构偏差轮胎有限元模拟接地印痕
Fig. 6 Finite element simulation footprints of structural deviation tires

模型计算得出的轮胎接地印痕形状及不对称因子与试验得到的规律一致。

4 结论

综合利用试验和有限元仿真方法,并引入不

表2 结构偏差轮胎有限元模拟接地印痕不对称因子对比
Tab. 2 Finite element simulation footprint asymmetry factor comparison of structural deviation tires

不对称因子	带束层整体偏移	胎肩厚度差异
L_{co}	1.00	0.93
P_{co}	1.00	0.95

对称因子表征轮胎接地印痕的不对称性,得出结构偏差对轮胎接地印痕的影响。结果表明,结构偏差易造成轮胎接地印痕不对称,左右胎肩厚度差异比带束层整体偏移对轮胎接地印痕不对称的影响更为显著。本研究结果为轮胎企业控制生产工艺和改善轮胎接地印痕提供了依据。

参考文献:

- [1] 俞洪. 子午线轮胎结构设计与制造技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] 樊攀. 车轮定位参数对轮胎磨损影响研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- [3] PERSSON B N J. Theory of rubber friction and contact mechanics[J]. Journal of Chemical Physics, 2001, 115 (8) : 840-863.
- [4] GUNARATNE M, BANDERS N, MEDZORIAN J, et al. Correlation of tire wear and friction to texture of concrete pavements[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 12 (1) : 46-54.
- [5] 彭旭东, 周受钦, 谢友柏, 等. 汽车轮胎磨损机理的研究[J]. 润滑与密封, 1999 (6) : 50-52.
PENG X D, ZHOU S Q, XIE Y B, et al. Study on wear mechanisms for automobile tires[J]. Lubrication Engineering, 1999 (6) : 50-52.
- [6] 陈国栋, 王传吉, 郭德益, 等. 全钢载重子午线轮胎带束层质量缺陷的原因分析及解决措施[J]. 橡胶科技市场, 2008, 6 (6) : 16-27.
CHEN G D, WANG C J, GUO D Y, et al. Cause analysis and solutions of belt quality defects of truck and bus radial tire[J]. China Rubber Science and Technology Market, 2008, 6 (6) : 16-27.
- [7] 韩平安, 雍占福, 王青春. 全钢载重子午线轮胎带束层结构对接地性能的影响[J]. 橡胶科技, 2014, 12 (3) : 38-41.
HAN P A, YONG Z F, WANG Q C. Influence of belt structure on the ground contact properties of TBR tire[J]. Rubber Science and Technology, 2014, 12 (3) : 38-41.
- [8] 廖发根, 吴晓东, 王昱壮, 等. 全钢载重子午线轮胎磨损的影响因素分析[J]. 轮胎工业, 2019, 39 (3) : 182-186.
LIAO F G, WU X D, WANG Y Z, et al. Analysis of influencing factors on wear of truck and bus radial tire[J]. Tire Industry, 2019, 39 (3) : 182-186.
- [9] 徐延海, 贾丽萍, 葛剑敏, 等. 结构参数对子午线轮胎特性的影响[J]. 汽车工程, 2004, 26 (2) : 168-171.
XU Y H, JIA L P, GE J M, et al. An investigation into the effects of structural parameters on the performance of radial-ply tires[J].

- Automotive Engineering, 2004, 26(2): 168-171.
- [10] CHEN L, WANG G L, AN D F, et al. Tread wear and footprint geometrical characters of truck bus radial tires[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(3): 506-511.
- [11] KALISKE M, SERAFINSKA A, ZOPF C. Optimized and robust design of tires based on numerical simulation[J]. Tire Science and Technology, 2013, 41(1): 21-39.
- [12] 梁晨, 王国林, 周海超, 等. 子午线轮胎接地压力分布评价试验研究[J]. 汽车技术, 2013(11): 38-42.
LIANG C, WANG G L, ZHOU H C, et al. Experimental study of radial tire contact pressure distribution evaluation[J]. Automotive Technology, 2013(11): 38-42.
- [13] 顾建, 骆文武, 钱熠. 轮胎制造过程中影响轮胎均匀性和动平衡的因素与控制[J]. 橡塑技术与装备, 2020, 46(1): 50-55.
GU J, LUO W W, QIAN Y. Control and affecting factors of tire uniformity and dynamic balance during tire manufacturing[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2020, 46(1): 50-55.
- [14] 冯琳阁, 辛振祥. 不对称带束层11.00R20全钢载重子午线轮胎有限元分析[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2012, 33(2): 177-182.
FENG L G, XIN Z X. Finite element analysis of 11.00R20 all steel radial truck tire with asymmetric belts[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 33(2): 177-182.
- [15] 王友善, 吴健, 粟本龙, 等. 大侧倾角条件下轮胎力学分析[J]. 轮胎工业, 2009, 29(9): 535-538.
WANG Y S, WU J, SU B L, et al. Analysis on mechanical behavior of tire under large side-tipping condition[J]. Tire Industry, 2009, 29(9): 535-538.
- [16] 李雪莉, 张元伟, 邱海漩. 基于轮胎稳态和瞬态特性的车辆响应研究[J]. 橡胶工业, 2020, 67(7): 495-501.
LI X L, ZHANG Y W, QIU H X. Study on vehicle response based on steady and transient characteristics of tire[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(7): 495-501.
- [17] 王宁宁, 周水庭, 孙鹏飞. 子午线轮胎接地特性和应变能分析试验与仿真研究[J]. 力学与实践, 2020, 42(3): 321-330.
WANG N N, ZHOU S T, SUN P F. Analysis of grounding characteristics and strain energy of radial tires with radial stiffness[J]. Mechanics in Engineering, 2020, 42(3): 321-330.
- [18] 王辉, 徐坤. 基于航空子午胎刚度仿真的动态磨损监控研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(8): 3033-3041.
WANG H, XU K. Dynamic wear monitoring based on stiffness simulation of aircraft radial tire[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 3033-3041.
- [19] 齐鹏, 王强, 王云龙, 等. 工程车辆翻新轮胎接地力学特性分析[J]. 交通科技与经济, 2018, 20(2): 39-44, 48.
QI P, WANG Q, WANG Y L, et al. Grounding mechanical properties analysis of engineering vehicle refurbished tire[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2018, 20(2): 39-44, 48.

收稿日期: 2021-05-10

Experimental and Simulation Research on Influence of Tire Structural Deviation on Footprint

TIAN Xudong¹, ZHOU Ping², LIAO Fagen¹, HOU Dandan¹, SU Benlong³

[1. Zhongce Rubber Group Co., Ltd, Hangzhou 310018, China; 2. Zhilun (Hangzhou) Technology Co., Ltd, Hangzhou 310018, China; 3. Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China]

Abstract: The influence of tire structural deviation (the overall belt deviation and the left and right shoulder thickness difference) on the tire footprint was studied by experimental and finite element simulation methods, and an asymmetry factor was introduced to characterize the asymmetry of the tire footprint. The results showed that the structural deviation was likely to cause the asymmetry of the tire footprint. The left and right shoulder thickness difference had a more significant influence on the asymmetry of the tire footprint than the overall belt deviation. The results of this study provided a basis for the tire production process control and improvement of the tire footprint.

Key words: tire; structural deviation; overall belt deviation; shoulder thickness difference; footprint; asymmetry; finite element analysis