

特约来稿

带束层膨胀对轮胎接地印痕的影响研究

崔志博^{1,2}, 侯丹丹^{3*}, 苏召乾², 张春生³, 王友善², 刘宇艳¹, 吴健², 栗本龙^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 化工与化学学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 中策橡胶集团有限公司 全钢子午胎研究所, 浙江 杭州 310008)

摘要:研究带束层膨胀对轮胎接地印痕的影响。对比多种普通带束层膨胀的钢丝帘线角度变化法则, 分析普通带束层膨胀对轮胎接地印痕仿真准确性的影响; 探讨0°带束层钢丝帘线的特性, 提出考虑0°带束层预应变的轮胎性能仿真方法, 并分析0°带束层预应变对轮胎接地印痕的影响。本研究结果可为轮胎的结构设计、工艺设计和仿真分析方面提供指导。

关键词:带束层膨胀; 轮胎接地印痕; 钢丝帘线; 角度变化; 预应变

中图分类号: TQ336.1; O241.82

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2021)01-0010-07

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2021.01.0010



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

带束层是子午线轮胎的核心部件,起着箍紧胎体、承受周向拉力和增加轮胎稳定性的作用^[1-2]。全钢子午线轮胎的带束层包括普通带束层和0°带束层。普通带束层由若干层与轮胎周向呈15°到20°的普通钢丝帘线构成,0°带束层钢丝帘线与轮胎周向呈0°,位于普通带束层端部,由高伸张钢丝帘线构成,起着减小普通带束层端部变形和提高轮胎耐久性能的作用。带束层角度和力学性能对轮胎性能有很大影响,是轮胎结构设计的关键参数^[3]。

在轮胎生产过程中,普通带束层的角度会发生变化,与其裁断角度出现差异,这主要有两方面的原因:(1)轮胎成型时,带束层等部件先贴于带束鼓上,此时带束层为平直几何构型,在后序成型胶囊的推动下,带束层会发生变形,导致带束层角度相应发生变化;(2)轮胎硫化过程中,由于内部高压过热水或高压高温蒸汽的作用,使胶料具有流动性,在压力作用下,胎面胶流入模具的花纹沟槽,此时带束层发生膨胀,导致钢丝帘线角度和间

距均发生变化。另外,由于胎面为弧形,在轮胎成型和硫化过程中,带束层会发生弯曲,进而导致带束层角度发生变化^[4]。0°带束层在轮胎成型和硫化阶段的膨胀会使其产生预应力并发生力学性能改变。

然而,轮胎成型和硫化过程导致的带束层角度和力学性能变化一直被忽视,相关研究鲜见报道。目前,轮胎仿真分析基本都将普通带束层角度设为其裁断角度,将0°带束层简化为线弹性材料,这会导致仿真结果不准确^[5-7]。因此,本工作考虑轮胎生产过程中带束层膨胀导致的角度和力学性能变化,研究其对轮胎接地印痕的影响。

1 普通带束层膨胀引起的钢丝帘线角度变化

假设带束层从贴合在成型鼓到轮胎成型的过程中钢丝帘线有一定伸长,伸长率为 ϵ ,轮胎成型前后带束层结构参数的几何关系如图1所示^[8],其中 A 和 B 为成型前带束层上钢丝帘线的端点, A_1 和 B_1 为成型后带束层上钢丝帘线的端点。结构参数间的

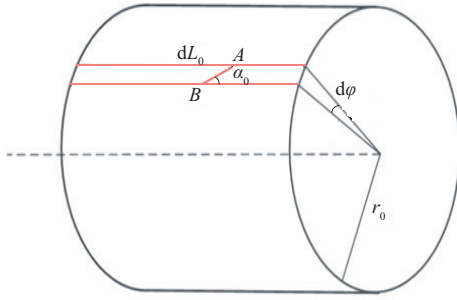
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51790502);哈尔滨工业大学国防科技重点实验室项目(JCKYS2019603C016)

作者简介:崔志博(1987—),男,河北承德人,哈尔滨工业大学博士,主要从事轮胎结构设计的研究工作。

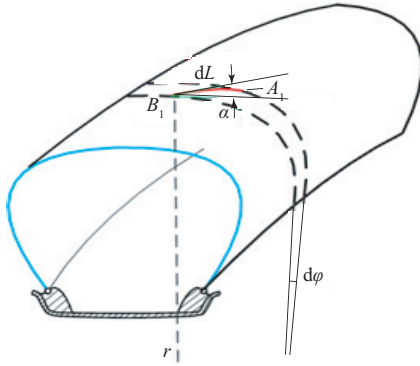
***通信联系人**(421035151@qq.com)

引用本文:崔志博,侯丹丹,苏召乾,等.带束层膨胀对轮胎接地印痕的影响研究[J].橡胶工业,2021,68(1):10-16.

Citation: CUI Zhibo, HOU Dandan, SU Zhaoqian, et al. Effect of Belt Expansion on Tire Ground Footprint[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(1): 10-16.



(a) 在成型鼓上



(b) 在成品轮胎中

图1 轮胎成型前后带束层的结构参数示意

Fig. 1 Structural parameters of belt before and after tire forming

公式如下:

$$A_1 B_1 = dL = (1 + \varepsilon) dL_0 \quad (1)$$

$$\sin \alpha_0 = \frac{r_0 d\varphi}{dL_0} \quad (2)$$

$$\sin \alpha = \frac{r d\varphi}{dL} = \frac{r d\varphi}{(1 + \varepsilon) dL_0} \quad (3)$$

$$\sin \alpha = \frac{r}{r_0(1 + \varepsilon)} \sin \alpha_0 \quad (4)$$

图1和式(1) — (4)中, L_0 和 L 分别为带束层膨胀前后钢丝帘线的长度, α_0 和 α 分别为带束层膨胀前后钢丝帘线的角度, r_0 和 r 分别为带束层钢丝帘线膨胀前后的半径, φ 为轮胎周向角度。

带束层膨胀前相邻两根钢丝帘线间距如图2所示,其变化关系可以通过几何分析获得。

$$u_0 = \frac{2\pi r_0}{N} \quad (5)$$

$$s_0 = u_0 \cos \alpha_0 = \frac{2\pi r_0}{N} \cos \alpha_0 \quad (6)$$

$$s = \frac{r \cos \alpha}{r_0 \cos \alpha_0} s_0 \quad (7)$$

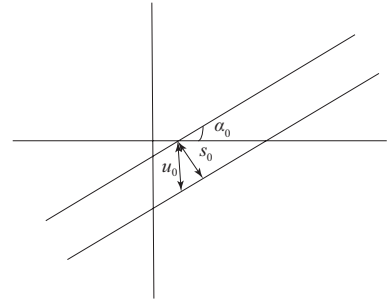


图2 带束层膨胀前相邻两根钢丝帘线间距示意

Fig. 2 Distance between two adjacent steel cords before belt expansion

式中, u_0 为带束层膨胀前相邻两根钢丝帘线沿轮胎周向的间距, N 为钢丝帘线根数, s_0 和 s 分别为带束层膨胀前后相邻两根钢丝帘线的垂直间距。

式(4)基于带束层上两相邻节点间线性长度的伸张关系而得,当 α 改为钢丝帘线与轮胎周向角度时,式(4)的正弦符号将会变为余弦符号,此时其被称为带束层膨胀的修正的余弦法则。

假设相邻两根钢丝帘线的垂直距离为常数时,得到钢丝帘线角度变化的正弦法则(所用角度与文献所用角度互余,采用传统文献的方法以正弦命名)为^[9]:

$$\cos \alpha = \frac{r_0 \cos \alpha_0}{r} \quad (8)$$

假设带束层钢丝帘线形成的网格面积为常数时,得到带束层钢丝帘线角度变化的正切法则(所用角度与文献所用角度互余,采用传统文献的方法以正切命名)为:

$$\cot \alpha = \frac{r_0^2 \cot \alpha_0}{r^2} \quad (9)$$

对于一般的余弦法则,需综合考虑测地线(通过曲面上两点且长度最短的线)和钢丝帘线伸张的影响,被称为广义余弦法则,有如下两种表达方式^[10]:

$$\sin \alpha = \left(\frac{r}{r_0}\right)^E \sin \alpha_0 \quad (10)$$

$$\sin \alpha = \lambda \frac{r}{r_0} \sin \alpha_0 \quad (11)$$

式中, E 和 λ 为常数或半径坐标的函数,没有固定的数值或表达式,常需根据经验或试验确定。

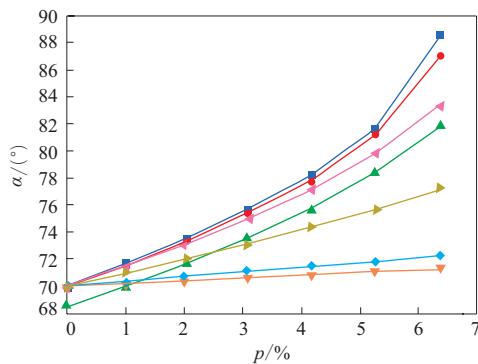
以上各种钢丝帘线角度变化法则均根据斜交轮胎胎体考虑,斜交轮胎胎体与子午线轮胎带束层在结构上的最大区别为边界条件不同。斜交轮胎胎体可视作两端固定,而子午线轮胎带束层的

两端为自由状态,因此子午线轮胎带束层的膨胀还存在边缘效应。带束层膨胀的边缘效应导致带束层几何参数的变化包括两部分:(1)与带束层中间部位相比,由于缺少约束,带束层边部钢丝帘线不会形成几何上的四边形网格,更容易发生间距变化,而角度变化相对较小;(2)由于缺少约束,加之测地线效应,会使带束层边部钢丝帘线角度变化较大。这两种影响的共同作用最终会导致带束层钢丝帘线角度发生何种变化目前并不明确,但无论是钢丝帘线角度变化还是间距变化,最终均反映带束层对胎体箍紧作用的强弱。

为了考察不同带束层膨胀的钢丝帘线角度变化法则的区别,以 $\alpha_0 = 70^\circ$ 为例,分析不同膨胀率(p)和不同法则下带束层钢丝帘线角度的变化规律。其中,膨胀率的定义为:

$$p = \frac{r - r_0}{r_0} \quad (12)$$

不同膨胀率下带束层钢丝帘线角度变化规律如图3所示。



■—修正的余弦法则(ε 为0); ●—修正的余弦法则(ε 为0.001);
▲—修正的余弦法则(ε 为0.01); ▼—正弦法则; ◆—正切法则;
◀—广义的余弦法则(E 为0.9); ▶—广义的余弦法则(E 为0.6)。

图3 不同膨胀率下带束层钢丝帘线角度变化规律
Fig. 3 Angle variation of belt steel cord under different expansion rates

从图3可以看出:在 α_0 一定时,随着膨胀率的增大,带束层钢丝帘线角度增大;正弦法则和正切法则下带束层钢丝帘线角度随着膨胀率的变化基本呈线性规律,并且正弦法则和正切法则下带束层钢丝帘线角度变化与余弦法则下差别较大;无论是修正的余弦法则还是广义的余弦法则,带束层钢丝帘线角度随着膨胀率的变化均呈现非线性关系。

根据文献[9],当膨胀率低于20%时, $E=0.9$ 的广义的余弦法则和 $\varepsilon=0$ 的修正的余弦法则均能得到较准确的结果;当膨胀率大于20%时,采用 $E=0.9$ 的广义的余弦法则才能获得较准确的结果。然而,从图3可以看出,在膨胀率为6.4%,根据 $E=0.9$ 的广义的余弦法则和 $\varepsilon=0$ 的修正的余弦法则所计算的带束层钢丝帘线角度差值可达 5° ,这说明文献[9]的结论具有局限性,带束层钢丝帘线角度变化法则的预测准确度与带束层裁断角度和轮胎结构设计相关。

对于修正的余弦法则,伸长率是一个很好的调控因数,通过调节伸长率,可实现带束层钢丝帘线角度设计值的变化,并且当 $\varepsilon=0$ 和 $\varepsilon=0.01$ 时的两条带束层钢丝帘线角度变化曲线包络了 $E=0.9$ 时的广义余弦法则曲线。

综上分析,轮胎带束层膨胀导致的钢丝帘线角度变化非常复杂,与其成型和硫化的膨胀率相关,不仅存在钢丝帘线伸长率和测地线的影响,还存在边缘效应的影响,同时与结构设计密切相关,很难从理论上预测各种带束层钢丝帘线角度变化法则的结构参数。因此,只能通过成品轮胎的特定性能来反推带束层钢丝帘线角度变化法则的结构参数。在众多带束层钢丝帘线角度变化法则中,修正的余弦法则具有很好的可控性,能够较好地表征带束层膨胀引起的钢丝帘线角度变化。由于轮胎带束层角度对轮胎的接地印痕有很大影响,并且接地印痕是轮胎测试的首要指标,下面研究带束层角度变化对轮胎接地印痕的影响。

2 普通带束层膨胀对轮胎接地印痕的影响

以235/75R17.5轮胎(无 0° 带束层)为例,采用Abaqus仿真系统对轮胎结构进行仿真分析,带束层钢丝帘线采用Rebar单元模拟,Abaqus仿真系统内嵌了表征Rebar单元带束层钢丝帘线角度变化的上升方程,即式(4)和(7),通过设置钢丝帘线的伸长率和半成品钢丝帘线半径即可自动生成随着该半径变化的Rebar角度。在轮胎充气压力为0.76 MPa,静态载荷为1.8 t时,带束层膨胀对轮胎接地印痕的影响(含仿真结果和试验结果,试验结果采用Tkscan压力毯测试)如图4所示。

从图4可以看出:当未考虑带束层膨胀(即未

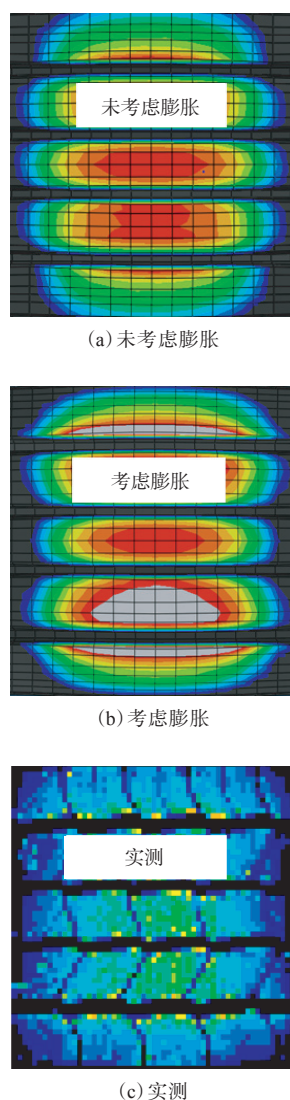


图4 普通带束层膨胀对轮胎接地印痕的影响
Fig. 4 Effect of common belt expansion on tire ground footprint

使用上升方程)时,轮胎的接地印痕呈胶囊形,两端长度较小,中间长度较大,与试验测试结果有明显区别;当考虑带束层膨胀时,在两端第1个花纹沟处接地印痕长度增大,明显大于中间部位长度,且接地印痕形状与试验测试结果吻合良好,说明考虑带束层膨胀效应的轮胎性能仿真方法更加合理。这主要是由于带束层膨胀之后改变了带束层钢丝帘线角度。对考虑带束层膨胀与否的轮胎结构仿真模型对比分析,发现考虑带束层膨胀时,带束层中间的钢丝帘线角度基本不发生变化,带束层边部的钢丝帘线角度变化约 3° ,从而降低了带束层对其边部的束缚能力;不考虑带束层膨胀的仿

真模型中带束层钢丝帘线角度均为设置的裁断角度,较考虑带束层膨胀时对印痕边部的束缚能力大,因此出现图4中的仿真结果。

3 0° 带束层钢丝帘线特性

轮胎带束层钢丝帘线特性对轮胎性能有着极其重要的影响。带束层钢丝帘线可分为普通钢丝帘线和高伸张钢丝帘线(见图5),其宏观结构可用捻距和捻角来标识^[11],如图6所示。

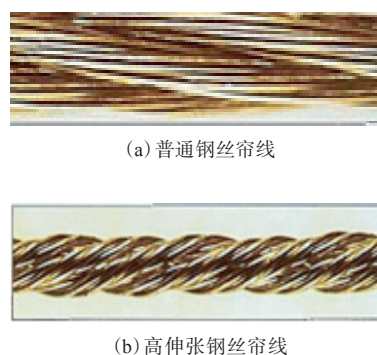


图5 带束层钢丝帘线示意
Fig. 5 Belt steel cord

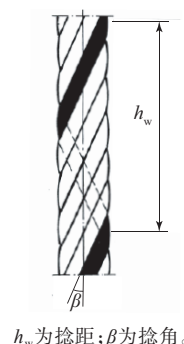


图6 带束层钢丝帘线的捻距和捻角示意
Fig. 6 Lay length and twist angle of belt steel cord

普通钢丝帘线的捻距较大,捻角较小,高伸张钢丝帘线则反之。当钢丝帘线承受拉力时,较大捻距和较小捻角的钢丝帘线变形较小,在应变较小时便能承受较大的拉力,而高伸张钢丝帘线承受拉力时先发生结构变形,变化趋势为捻距增大,捻角减小,这样钢丝帘线中的细丝才能更充分地承受拉伸应力。

普通带束层(如第1,2和3带束层)一般采用普通钢丝帘线,而 0° 带束层一般采用高伸张钢丝帘线,如图7所示。典型的普通钢丝帘线和高伸张钢

丝帘线的拉伸曲线如8所示。



图7 普通钢丝帘线和高伸长钢丝帘线在带束层中的位置示意

Fig. 7 Position of common steel cord and high elongation steel cord in belt

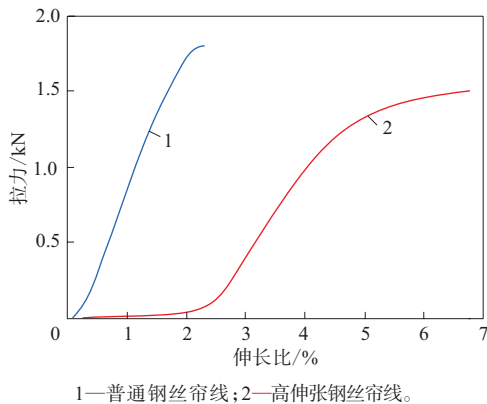


图8 普通钢丝帘线和高伸长钢丝帘线的拉伸曲线对比
Fig. 8 Comparison of tensile curves between common steel cord and high elongation steel cord

从图8可以看出:普通钢丝帘线的拉伸曲线斜率较大,基本呈线性,最大伸长比只有2.3%左右;高伸长钢丝帘线的拉伸曲线具有比较平坦的区段,当承受0.05 kN拉力时其伸长比就达2.3%,当应力继续增大,拉伸曲线斜率明显增大。高伸长钢丝帘线这种拉伸特性对轮胎性能影响很大,传统的轮胎性能仿真分析一般没有考虑高伸长钢丝帘线的这一特性,仅采用线弹性本构模型来表征钢丝帘线的力学行为,由此导致仿真结果不够准确。

4 0°带束层膨胀对轮胎接地印痕的影响

轮胎在硫化后0°带束层钢丝帘线具有一定的预应变,在分析轮胎充气 and 变形时,应考虑0°带束层钢丝帘线的预应变对轮胎拉伸曲线的影响。成品轮胎中0°带束层钢丝帘线的预应变可由下式计算:

$$\varepsilon_0 = \frac{d_v - d_0}{d_0} \quad (13)$$

式中, ε_0 为0°带束层中钢丝帘线的预应变, d_v 为成

品轮胎中0°带束层的半径, d_0 为带束鼓上0°带束层的半径。

为了解决轮胎性能仿真结果不准确的问题,需要考虑0°带束层的钢丝帘线预应变对仿真结果的影响,通过对带束层钢丝帘线拉伸曲线进行平移处理(将钢丝帘线拉伸曲线的预应变部分数值去除)可实现此功能。

为了验证0°带束层钢丝帘线特性对轮胎性能的影响,选取具有典型0°带束层结构的轮胎进行分析,不同预应变下0°带束层钢丝帘线拉伸应力-应变曲线如图9所示。

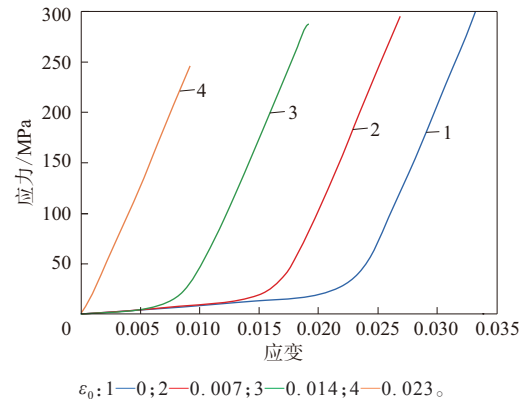


图9 不同预应变下0°带束层钢丝帘线拉伸应力-应变曲线
Fig. 9 Tensile stress-strain curves of 0° belt steel cord under different prestrain

从图9可以看出,随着预应变的增大,0°带束层钢丝帘线拉伸应力-应变曲线的平坦区段缩短。将图9中不同预应变下的钢丝帘线特性代入相同的轮胎仿真模型进行计算,轮胎接地印痕如图10所示。

从图10可以看出,不同0°带束层钢丝帘线预应变的轮胎接地印痕差别很大,随着预应变的增大,接地印痕端部长度逐渐减小,接地印痕从明显的“蝴蝶形”转变为近似矩形。这主要是由于0°带束层钢丝帘线预应变的微小改变对轮胎的磨损性能和耐久性能等会产生很大的影响,因此在进行轮胎性能仿真分析中考虑0°带束层钢丝帘线特性是必要的。通过与实测结果对比(见图11),发现0°带束层钢丝帘线的预应变为0时轮胎接地印痕与实测结果相差较大,而预应变为0.014时吻合较好,这从逆向证明了0°带束层钢丝帘线预应变的存在,证明了本工作的合理性。

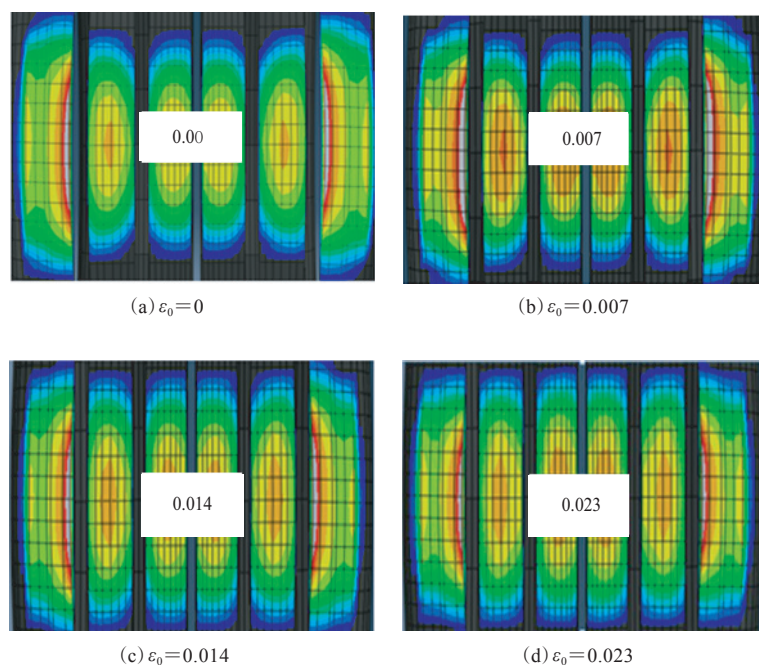


图10 0° 带束层钢丝帘线预应变对仿真轮胎接地印痕的影响
Fig. 10 Effect of prestrain of 0° belt steel cord on tire ground footprint

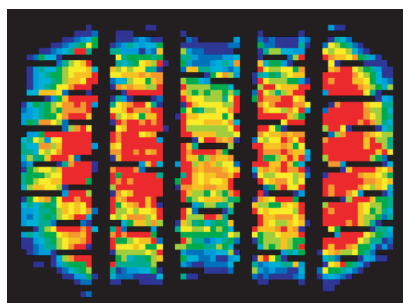


图11 实测轮胎接地印痕
Fig. 11 Measured tire ground footprint

5 结论与展望

本工作主要研究了轮胎成型和硫化过程中带束层膨胀引起的带束层钢丝帘线角度和力学性能变化规律及其对轮胎接地印痕的影响,结论如下。

(1)随着普通带束层膨胀率的增大,带束层边部钢丝帘线角度增大。

(2)对于无 0° 带束层的轮胎,需要考虑带束层膨胀引起的钢丝帘线角度和间距变化才能获得较准确的仿真结果,带束层膨胀会引起带束层边部的箍紧能力减弱,使带束层边部对应位置的接地印痕长度增大。

(3)对于具有 0° 带束层结构的轮胎,需考虑 0°

带束层膨胀引起的钢丝帘线力学性能变化,随着 0° 带束层钢丝帘线预应变的增大,与 0° 带束层对应位置的接地印痕长度减小。

带束层膨胀对轮胎性能的影响巨大,但目前对带束层膨胀过程和规律的研究不够深入,有如下问题需要进一步研究。

(1)在众多的带束层膨胀法则中,如何选用适宜法则,如何获得带束层结构参数?

(2)影响带束层膨胀的钢丝帘线伸张效应、测地线效应和边缘效应中何种效应占主导地位,与哪些因素相关?

(3)带束层膨胀引起的钢丝帘线角度和间距变化过程有何特点,受轮胎结构设计以及成型和硫化工艺的影响规律如何?

(4)轮胎硫化过程对于钢丝帘线材料来说是一个热处理过程, 0° 带束层钢丝帘线的预应变中拉伸和热处理导致的永久变形占比多大?

本工作可为轮胎的结构设计、工艺设计和仿真分析方面提供指导。

参考文献:

- [1] 郑正仁. 子午线轮胎技术与应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1994.

- [2] 黄兆阁,李长宇,孟祥坤,等. 235/45R18轮胎带束层帘线的有限元优化设计[J]. 橡胶工业,2020,67(3):209-213.
- [3] 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.
- [4] Jeong K M. Prediction of Burst Pressure of a Radial Truck Tire Using Finite Element Analysis[J]. World Journal of Engineering and Technology,2016,4(2):228-237.
- [5] 张炬栋,王泽君,张颖,等. 带束层角度对全钢载重子午线轮胎性能影响的有限元分析[J]. 轮胎工业,2018,38(8):472-474.
- [6] 陈蔚,马改陵,崔文勇. 带束层角度对全钢子午线轮胎应力影响的有限元分析[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2005(6):82-86.
- [7] 赵国群,程钢,管延锦. 带束层角度对子午胎结构性能影响的三维非线性有限元分析[J]. 弹性体,2004(1):35-38.
- [8] 霍玉云. 橡胶制品设计与制造[M]. 北京:化学工业出版社,1998.
- [9] Koutny F. Geometry and Mechanics of Pneumatic Tires[M]. Zlin: CZE,2007.
- [10] Robecchi E,Amici L. Mechanics of the Pneumatic Tire,part I: The Tire Under Inflation Alone[J]. Tire Science & Technology,1973,1(3):290-345.
- [11] Phillips J W, Costello G A. Analysis of Wire Ropes with Internal-Wire-Rope Cores[J]. Journal of Applied Mechanics,1985,52(3):510-516.

收稿日期:2020-07-02

Effect of Belt Expansion on Tire Ground Footprint

CUI Zhibo¹, HOU Dandan², SU Zhaoqian¹, ZHANG Chunsheng², WANG Youshan¹, LIU Yuyan¹, WU Jian¹, SU Benlong¹

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Zhongce Rubber Group Co., Ltd, Hangzhou 310008, China)

Abstract: In this paper, the effect of belt expansion on tire ground footprint was studied. The steel cord angle change rule of a variety of ordinary belt layer expansion was comparatively studied, and the effect of common belt expansion on the simulation accuracy of tire ground footprint was analyzed. The characteristics of 0° belt steel cord were discussed, the tire performance simulation method considering 0° belt pre-strain was put forward, and the effect of the 0° belt pre-strain on tire ground footprint was analyzed. The results of this study could provide guidance for tire structural design, process design and simulation analysis.

Key words: belt expansion; tire ground footprint; steel cord; angle change; pre-strain

东南亚天然橡胶货紧价扬 进入2020年10月份以来,东南亚地区受天气及胶工不足等因素影响,天然橡胶主产区收割进程受阻,天然橡胶船货价格宽幅上涨。10月中旬,泰国、越南等东南亚国家天然橡胶价格周涨幅均在10%以上。市场人士预计,随着后市强降雨等恶劣天气持续,天然橡胶主产区产能难有大幅提升,亚洲天然橡胶供应将维持偏紧格局,市场价格或将延续涨势。

18号台风“莫拉菲”生成,将对越南、柬埔寨甚至是泰国、中国等国家形成降雨天气,继续影响天然橡胶主产区的产量。

除受恶劣天气影响之外,新冠肺炎疫情也影响了割胶进程。缅甸国内疫情严重,边境封锁,限制了天然橡胶供应。马来西亚部分地区封锁,导致人员流动受限,而非洲进口原料同样因疫情影响,船期延迟。马来西亚标胶加工厂生产难以

提量,供应商囤货观望。整体来看,主产区天然橡胶产量受到影响,减产已成定局。

主产区产出严重不足,导致天然橡胶市场价格大涨。产区人士表示,即便后期雨水减少,但由于胶工不足,天然橡胶产量亦难快速提量。鉴于原料采购困难,泰国供应商有意控制销售节奏,货源优先供应长约客户,乳胶控单限量出售。越南天然乳胶涨势更猛,且销售利润更高,在胶乳供应有限的情况下,加工厂优先生产乳胶。

此外,马来西亚受疫情影响,医疗手套需求暴增,对原料也保持较大采购量,推动了天然橡胶市场价格的走高。

后市来看,11月份东南亚天然橡胶主产区将进入旺产季,供应将提量,但胶工不足仍将制约产量提升。此外,拉尼娜现象愈加明显,天然橡胶或持续偏紧格局,为后市注入活力。

(摘自《中国化工报》,2020-11-02)