

应用理论

## 复杂花纹轿车子午线轮胎带束层结构对 轮胎高速温度场的影响研究

史彩霞<sup>1</sup>, 孟照宏<sup>1</sup>, 苏明<sup>1</sup>, 王君<sup>1</sup>, 罗宝玉<sup>1</sup>, 和燕<sup>2</sup>

(1. 青岛双星轮胎工业有限公司, 山东 青岛 266400; 2. 北京橡胶工业研究设计院有限公司, 北京 100143)

**摘要:**对复杂花纹轿车子午线轮胎进行3D建模和高速生热仿真分析,从热力学角度研究带束层结构对轮胎高速温度场的影响,分析帘布层转向效应与花纹结构耦合延缓或加速材料疲劳失效的机理。结果表明:轮胎高速生热与带束层结构参数的相关性从大到小依次为带束层帘线角度、带束层总宽度和带束层帘线经密度;在考察的轮胎行驶速度区间内,行驶速度每提升 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,轮胎各易失效观测点的温度提升幅度均大于 $3^\circ\text{C}$ ,且轮胎模型左右两侧相同观测点的温度差值随着行驶速度的提升呈增大趋势;胎面花纹沟槽结构对轮胎内部热量的快速扩散有非常重要的作用,合理的花纹结构能够减缓轮胎高速失效,但胎面花纹结构布置需要考虑帘布转向效应的影响,以避免两者相互耦合加速橡胶材料疲劳破坏。

**关键词:**轿车子午线轮胎;复杂花纹;带束层;高速温度场;帘布层转向效应;有限元分析

**中图分类号:** TQ336.1<sup>+</sup>1; O241.82

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-890X(2022)08-0578-08

**DOI:** 10.12136/j.issn.1000-890X.2022.08.0578



OSID开放科学标识码  
(扫码与作者交流)

轿车子午线轮胎是由橡胶材料与骨架材料复合而成的车辆承载部件,对车辆的行驶安全、舒适性、燃油经济性等都起着重要作用<sup>[1]</sup>。轿车子午线轮胎结构如图1所示,其中带束层作为主要受力部件,承受了轮胎60%~70%的负荷,并在轮胎受到外来冲击时起到缓冲、减振作用<sup>[2]</sup>,因此其结构设计是轮胎结构设计重点之一。

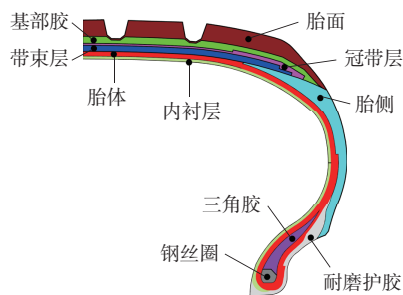


图1 轿车子午线轮胎结构示意图  
Fig. 1 Diagram of PCR tire structure

轮胎在高速运转状态下出现的疲劳损坏主要集中在骨架帘线端点附近,失效位置通常在高生热的一侧。如何直观地量化和考评带束层结构对轮胎高速性能的影响一直是国内外学者研究的重点课题。对轮胎高速运转过程进行热成像监测能够快速评判带束层结构参数的合理性,但对监测设备实时成像能力和分辨率有很高的要求,且设备成本高,很少有试验机构配置;另外一种有效且成本较低的途径为仿真预测。S. KIM等<sup>[3]</sup>对带束层部位的橡胶材料进行失效表征,并对其光面轮胎高速性能进行有限元仿真,然后将应变能密度预测结果代入材料失效方程,构建了轮胎高速疲劳失效的数学模型,最后通过多种规格轮胎试验进行了有效性验证。宁卫明等<sup>[2]</sup>采用Abaqus有限元分析软件对带纵向主沟的简化花纹轿车子午线轮胎进行建模预测,通过对帘布层应力云图对

**作者简介:**史彩霞(1986—),女,山东青岛人,青岛双星轮胎工业有限公司工程师,硕士,主要从事轮胎力学仿真研究。

**E-mail:** caixia2006a@126.com

**引用本文:**史彩霞,孟照宏,苏明,等.复杂花纹轿车子午线轮胎带束层结构对轮胎高速温度场的影响研究[J].橡胶工业,2022,69(8):578-585.

**Citation:** SHI Caixia, MENG Zhaohong, SU Ming, et al. Study on influence of belt structure on high-speed temperature field of PCR tire with complex pattern[J]. China Rubber Industry, 2022, 69(8): 578-585.

比分析,发现带束层帘线角度在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内时,轮胎高速性能随带束层帘线角度的增大而提高。宋喜岗<sup>[4]</sup>对光面轮胎内部生热和轮胎温度场进行了分析研究,开发了专门的红外测温装置进行仿真验证,以此研究负荷、充气压力、胎面宽度等因素对轮胎温度场的影响,建立了轮胎温升与这些影响因素的回归方程。吴文天<sup>[5]</sup>对光面轮胎高速温度场进行有限元建模仿真,探究了负荷、速度和带束层结构参数等对轮胎高速性能的影响。N. YUKIO等<sup>[6-13]</sup>研究了光面轮胎带束层结构对轮胎力学性能和温度场的影响。

使用Abaqus软件稳态传输命令分析光面轮胎和带纵向主沟的简化花纹轮胎温度场,会造成轮胎模型左右两侧温度差异很小,无法表现出帘布层转向效应对温度场的影响,也无法解释滚动轮胎高速失效的非对称性,以及花纹结构与帘布层转向效应相互耦合减缓或加速材料失效的原因。

本工作以205/50ZR17 93W DSU02轿车子午线轮胎为研究对象,通过建立复杂花纹轮胎3D温度场模型,表征轮胎带束层结构参数变化对轮胎高速性能的影响,并阐述轮胎花纹结构与帘布层转向效应耦合影响材料失效的机理,可为轮胎设计提供理论指导<sup>[14-15]</sup>。

## 1 轮胎有限元模型

### 1.1 材料模型

轮胎用橡胶材料属于超-粘弹性且几乎不可压缩材料,其超弹特性常用Neo-Hookean, Yeoh, Mooney-Rivlin等本构模型表征,粘弹特性常用Prony级数、时温等效方程(WLF方程)和松弛参数等表征。

采用美国英斯特朗公司的Instron 5966型高低温材料拉伸试验机对去除Mullins效应的橡胶材料进行拉伸测试,测试数据用Yeoh本构模型进行表征;采用德国Gabo公司的Eplexor<sup>®</sup> 150N型动态热力学分析(DMA)仪测试橡胶材料粘弹特性,测试数据用WLF方程进行表征;采用美国梅特勒-托力多公司的差示扫描量热(DSC)仪测试橡胶材料热扩散系数、热导率和比热容等,这些参数用六阶多项式进行表征<sup>[16-19]</sup>。这3种试验仪器如图2所示。

拉伸试验条件:测试温度为40, 60和80 $^{\circ}\text{C}$ ,拉



(a) 高低温材料拉伸试验机



(b) DMA仪



(c) DSC仪

图2 橡胶材料测试仪器

Fig. 2 Instruments for rubber material tests

伸应变范围为 $0\sim 30\%$ ,预测试拉伸循环不少于20次,测试速度为 $30\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,正式测试时重新夹持试样,将试样拉断。

DMA测试条件:温度为 $-10\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,应变为 $10\%\pm 3\%$ ,测试频率为 $0.01\sim 100\text{ Hz}$ 。

DSC测试条件:温度为 $30\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

胎面胶Yeoh本构模型参数 $C_{10}$ ,  $C_{20}$ ,  $C_{30}$ 如表1所示,WLF方程移位因子如表2所示。

### 1.2 结构模型

基于轮胎有限元结构建模研究成果<sup>[15,20]</sup>,以205/50ZR17 93W DSU02轿车子午线轮胎为研究对象,复杂花纹轮胎有限元建模流程如图3所示。

表1 胎面胶Yeoh本构模型参数

Tab. 1 Parameters of Yeoh constitutive model of tread compound

| 温度/℃ | $C_{10}$ | $C_{20}$ | $C_{30}$ | 压缩率     |
|------|----------|----------|----------|---------|
| 40   | 0.484 7  | -0.650 9 | 1.075 1  | 0.062 5 |
| 60   | 0.376 9  | -0.240 0 | 0.281 1  | 0.080 4 |
| 80   | 0.234 2  | -0.012 7 | 0.020 0  | 0.129 4 |

表2 胎面胶WLF方程移位因子

Tab. 2 Shift factors of WLF equation of tread compound

| 温度/℃ | 移位因子    | 温度/℃ | 移位因子     |
|------|---------|------|----------|
| -10  | 2.512 3 | 50   | -0.358 6 |
| 10   | 1.329 6 | 80   | -1.254 9 |
| 30   | 0.396 5 | 120  | -2.150 7 |

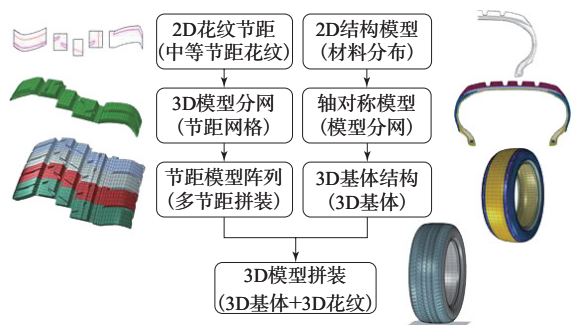


图3 复杂花纹轮胎有限元建模流程  
Fig. 3 Finite element modeling process of tire with complex pattern

从图3可以看出,复杂花纹轮胎有限元建模包含3步。(1)轮胎轴对称3D基体结构建模。在Abaqus软件中,基于轮胎轮廓和材料分布建立2D轴对称无花纹网格模型,再将其通过\*SYMMETRIC MODEL GENERATION命令周向等分180份建立3D基体模型。(2)3D复杂花纹模型构建。将在CATIA 3D建模软件中建立的中等节距花纹模型进行3D网格划分。(3)整胎模型构建。在Abaqus软件中,将周向阵列生成的3D花纹网格模型与3D基体模型绑定,拼装成完整的轮胎有限元结构模型。由此,复杂花纹轮胎模型包含节点316 428个、橡胶实体单元226 944个、加强筋单元69 120个。

## 2 轮胎有限元模型验证及高速温度场仿真方案设计

### 2.1 模型验证

鉴于本实验室未配置轮胎高速热成像监测装

置,无法直接对轮胎温度场预测模型进行验证,因此,本工作从滚动生热角度对轮胎有限元模型滚动阻力测试结果进行对比验证,同时对接地印痕和滚动半径进行对比验证,测试条件如表3所示。

表3 轮胎有限元分析验证条件

Tab. 3 Verification conditions of tire finite element analysis

| 项 目  | 充气压力/kPa | 径向负荷/N | 速度/(km·h <sup>-1</sup> ) |
|------|----------|--------|--------------------------|
| 接地印痕 | 220      | 4 800  |                          |
| 滚动阻力 | 220      | 4 800  | 80                       |
| 滚动半径 | 220      | 4 800  | 60, 80, 100, 120, 140    |

注:1)接地印痕按GB/T 22038—2008在天津久荣工业技术有限公司的五刚度试验机上测试;2)滚动阻力按ISO:28580—2018在德国采埃孚公司的滚动阻力试验机上测试;3)滚动半径在美国MTS系统公司的Flat-Trac CT III六分力试验台上测试;4)充气压力和径向负荷参考某主机厂提供的测试要求确定。

轮胎接地印痕、滚动半径和滚动阻力仿真验证结果如图4和5及表4所示。

从图4和5及表4可以看出,轮胎接地印痕长短轴长度和包络形状、负荷滚动半径和自由滚动半径、滚动阻力的仿真结果与试验结果相差不大,表明轮胎滚动状态和内部滞后生热仿真可以用于轮胎高速性能的预测。

### 2.2 轮胎高速温度场仿真方案设计

本工作采用单一变量法分别从带束层帘线角度(各带束层相同)、带束层帘线经密度(各带束层相同)和带束层总宽度3个方面制定15个方案。

带束层帘线角度分别为23°,25°,27°,29°,31°时,对应方案编号为1<sup>#</sup>—5<sup>#</sup>;带束层帘线经密度分别为600,700,800,900,1 000根·m<sup>-1</sup>时,对应方案编号为6<sup>#</sup>—10<sup>#</sup>;保持带束层之间的宽度差级,调整带束层总宽度分别为144,150,156,162,168 mm时,对应方案编号为11<sup>#</sup>—15<sup>#</sup>。其中,带束层帘线角度为27°、带束层帘线经密度为800根·m<sup>-1</sup>、带束层总宽度为162 mm、双层胎体设计为现行轮胎方案。

## 3 结果与讨论

### 3.1 带束层结构参数对轮胎高速温度场的影响

典型行驶速度下不同方案轮胎对应的易失效观测点温度预测结果如表5所示。不同方案轮胎

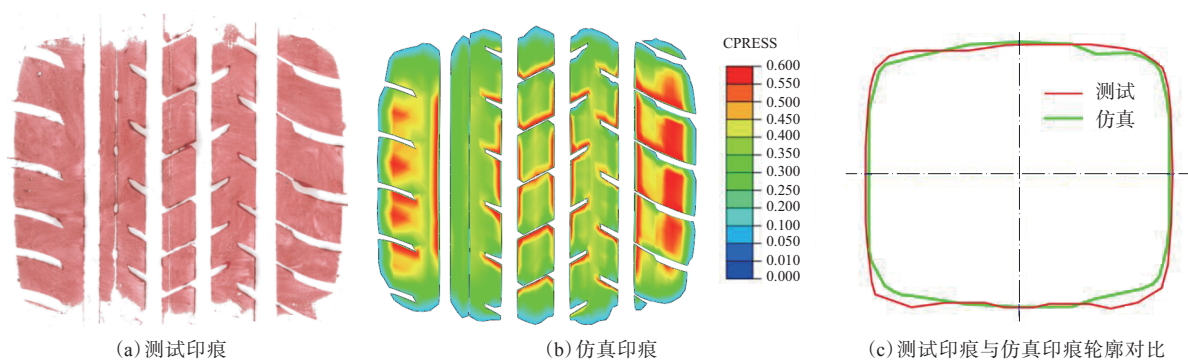


图4 轮胎接地印痕仿真验证结果  
Fig. 4 Simulation verification results of tire footprint

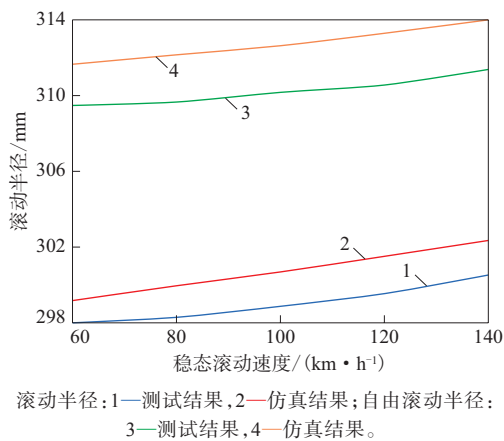


图5 轮胎滚动半径仿真验证结果  
Fig. 5 Simulation verification results of tire rolling radius

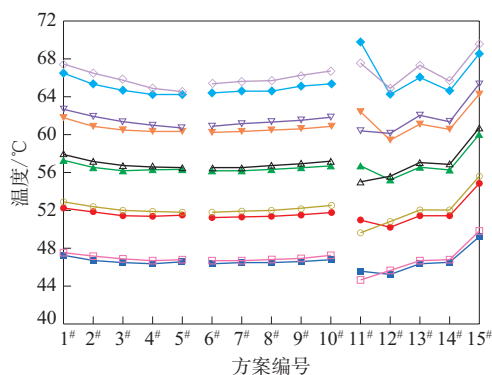
| 表4 轮胎接地印痕参数和滚动阻力仿真验证结果                                                                      |        |        |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|-------|
| Tab. 4 Simulation verification results of tire footprint parameters and rolling resistances |        |        |       |
| 项 目                                                                                         | 仿真结果   | 测试结果   | 误差/%  |
| 接地印痕参数                                                                                      |        |        |       |
| 接地印痕长轴长度/mm                                                                                 | 139.0  | 136.0  | -2.21 |
| 接地印痕短轴长度/mm                                                                                 | 157.7  | 161.0  | 2.05  |
| LSHW <sup>1)</sup> /mm                                                                      | 126.27 | 136.00 | 7.15  |
| RSHW <sup>2)</sup> /mm                                                                      | 125.96 | 132.00 | 4.58  |
| 滚动阻力/N                                                                                      | 34.40  | 35.56  | 3.26  |

注: 1) 和2) 分别为轮胎左、右侧胎肩花纹块的接地印痕长度。  
带束层左、右端点温度变化如图6所示, 第2胎体帘布层左、右端点温度变化如图7所示, 胎冠中心最高温度变化如图8所示, 左、右胎圈处最高温度变

表5 典型速度下不同方案轮胎对应的易失效观测点温度预测结果  
Tab. 5 Temperature prediction results of failure observation points corresponding to different scheme tires under typical speeds

| 方案<br>编号        | 带束层左端点 <sup>1)</sup> |                   |                   | 第2胎体帘布层左端点 <sup>1)</sup> |                   |                   | 胎冠中心最高温度          |                   |                   | 左胎圈最高温度           |                   |                   |
|-----------------|----------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                 | 100 <sup>2)</sup>    | 120 <sup>2)</sup> | 140 <sup>2)</sup> | 100 <sup>2)</sup>        | 120 <sup>2)</sup> | 140 <sup>2)</sup> | 100 <sup>2)</sup> | 120 <sup>2)</sup> | 140 <sup>2)</sup> | 100 <sup>2)</sup> | 120 <sup>2)</sup> | 140 <sup>2)</sup> |
| 1 <sup>#</sup>  | 57.20                | 61.70             | 66.40             | 52.01                    | 55.82             | 61.12             | 44.10             | 47.40             | 51.00             | 67.60             | 71.50             | 77.00             |
| 2 <sup>#</sup>  | 56.50                | 60.80             | 65.30             | 52.41                    | 56.61             | 63.62             | 43.70             | 46.90             | 50.30             | 66.40             | 70.20             | 76.30             |
| 3 <sup>#</sup>  | 56.20                | 60.40             | 64.60             | 52.91                    | 58.31             | 64.71             | 43.50             | 46.60             | 49.80             | 65.30             | 69.70             | 74.90             |
| 4 <sup>#</sup>  | 56.20                | 60.30             | 64.30             | 54.01                    | 60.51             | 65.01             | 43.40             | 46.50             | 49.60             | 64.70             | 69.30             | 73.40             |
| 5 <sup>#</sup>  | 56.30                | 60.20             | 64.20             | 56.81                    | 61.31             | 65.21             | 43.50             | 46.50             | 49.60             | 65.10             | 68.60             | 71.90             |
| 6 <sup>#</sup>  | 56.00                | 60.10             | 64.40             | 53.01                    | 59.01             | 65.21             | 43.60             | 46.80             | 50.10             | 64.90             | 69.60             | 74.30             |
| 7 <sup>#</sup>  | 56.10                | 60.30             | 64.60             | 53.01                    | 58.61             | 65.31             | 43.60             | 46.70             | 50.00             | 65.10             | 69.60             | 74.60             |
| 8 <sup>#</sup>  | 56.20                | 60.40             | 64.60             | 52.91                    | 58.31             | 64.71             | 43.50             | 46.60             | 49.80             | 65.30             | 69.70             | 74.90             |
| 9 <sup>#</sup>  | 56.40                | 60.60             | 65.10             | 52.81                    | 57.81             | 65.61             | 43.40             | 46.60             | 49.80             | 65.60             | 69.70             | 75.60             |
| 10 <sup>#</sup> | 56.60                | 60.80             | 65.40             | 52.71                    | 57.31             | 65.61             | 43.40             | 46.50             | 49.70             | 66.00             | 69.90             | 76.20             |
| 11 <sup>#</sup> | 56.50                | 62.30             | 69.70             | 56.41                    | 63.91             | 71.62             | 43.80             | 47.50             | 51.80             | 67.80             | 74.30             | 83.30             |
| 12 <sup>#</sup> | 55.20                | 59.50             | 64.20             | 54.51                    | 61.11             | 66.71             | 43.50             | 46.80             | 50.20             | 64.80             | 70.30             | 75.80             |
| 13 <sup>#</sup> | 56.50                | 61.10             | 66.10             | 53.21                    | 58.71             | 66.31             | 43.30             | 46.50             | 49.90             | 65.60             | 70.40             | 76.90             |
| 14 <sup>#</sup> | 56.20                | 60.40             | 64.60             | 52.91                    | 58.31             | 64.71             | 43.50             | 46.60             | 49.80             | 65.30             | 69.70             | 74.90             |
| 15 <sup>#</sup> | 60.00                | 64.30             | 68.50             | 52.51                    | 56.51             | 63.81             | 44.20             | 47.30             | 50.50             | 65.50             | 69.00             | 74.00             |

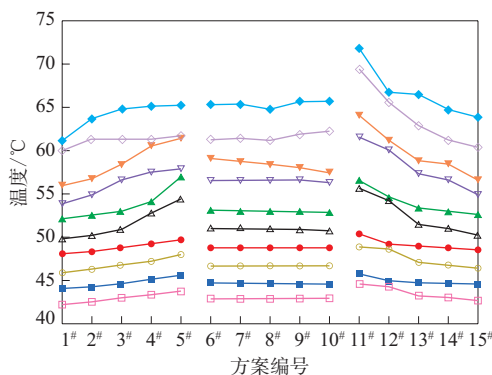
注: 1) 左、右与图4所示接地印痕左、右(两侧)相对应; 2) 轮胎行驶速度(km · h<sup>-1</sup>)。



左端点处, 轮胎速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ): ■—60; ●—80; ▲—100; ▼—120; ◆—140。右端点处, 轮胎速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ): □—60; ○—80; △—100; ▽—120; ◇—140。

图6 不同方案轮胎束带层左、右端点温度变化

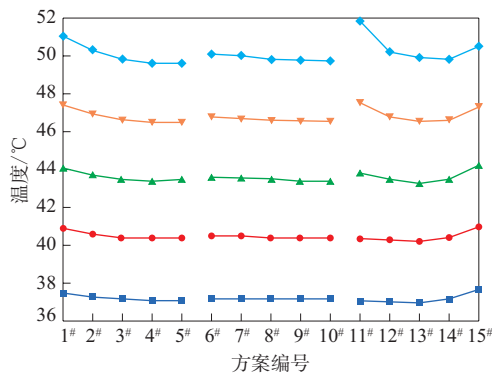
Fig. 6 Temperature changes of left and right end points of different scheme tire belts



注同图6。

图7 不同方案轮胎第2胎体帘布层左、右端点温度变化

Fig. 7 Temperature changes of left and right end points of second carcass cord of different scheme tires

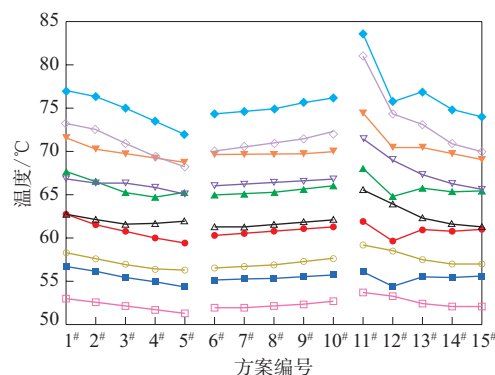


轮胎速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ): ■—60; ●—80; ▲—100; ▼—120; ◆—140。

图8 不同方案轮胎胎冠中心最高温度变化

Fig. 8 Maximum temperature changes in crown centers of different scheme tires

化如图9所示。



注同图6。

图9 不同方案轮胎左、右胎圈处最高温度变化

Fig. 9 Maximum temperature changes at left and right beads of different scheme tires

从表5及图6—9可以看出:在60~140  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  的轮胎行驶速度区间内,行驶速度每提升20  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,轮胎各易失效观测点温度呈阶梯式提升,提升幅度均在3  $^{\circ}\text{C}$  以上,部分设计方案甚至达到8  $^{\circ}\text{C}$  以上;行驶速度越高,轮胎内部生热越大。

从表5和图6可以看出,带束层端点的温度随着带束层帘线角度的增大而降低,随着带束层帘线经密度的增大而升高,随着带束层总宽度的增大呈现波浪形变化。在带束层帘线角度大于27°、带束层帘线经密度小于800 根· $\text{m}^{-1}$ 、带束层总宽度在150或162 mm时,带束层端点的生热相对较低,对轮胎高速行驶安全性能有利。

从表5和图7可以看出,第2胎体帘布层端点的温度随着带束层帘线角度的增大而升高,随着带束层总宽度的增大而降低。随着轮胎行驶速度的增大,适当减小带束层帘线角度、增大带束层帘线经密度、增大带束层总宽度对降低第2胎体帘布层端点部位疲劳失效有利。

从表5和图8可以看出,胎冠中心最高温度随着带束层帘线角度和带束层帘线经密度的增大而降低,随着带束层总宽度的增大先降低后升高。选用较大的带束层帘线角度和带束层帘线经密度、带束层总宽度在150~162 mm之间时,能够降低胎冠中心的升温。

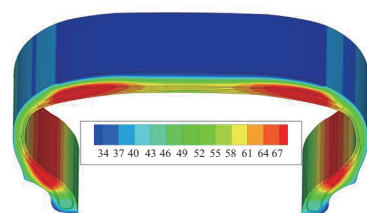
从表5和图9可以看出,胎圈处最高温度随着

带束层带束层帘线角度和带束层总宽度的增大而降低,随着带束层帘线经密度的增大而增大。

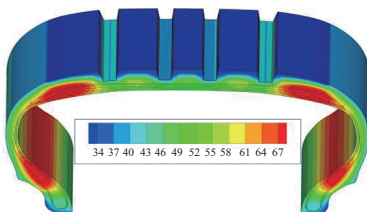
从轮胎高速温度场预测结果可以看出,通过长时间、多次试制筛选出的现行轮胎方案处于预测的较优位置,验证了本工作高速温度场预测结果的准确性。

### 3.2 帘布层转向效应对轮胎高速温度场的影响

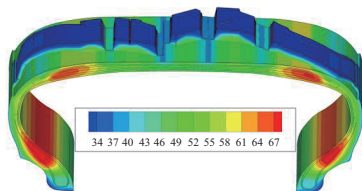
现行方案轮胎在 $140 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 行驶速度下的温度场分布云图如图10所示,调整花纹后在不同行驶速度下的侧向力曲线如图11所示。



(a) 光面轮胎



(b) 简单花纹轮胎



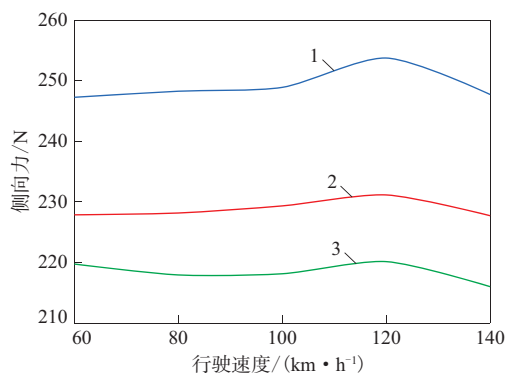
(c) 复杂花纹轮胎

图10 现行方案轮胎在 $140 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 行驶速度下的温度场分布云图

Fig. 10 Distribution nephograms of temperature fields of current scheme tires under  $140 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  driving speed

从图6,7和9可以看出,轮胎模型左右两侧各观测点的温度呈非对称分布,且随着轮胎行驶速度的提升,温度差异逐渐加大,由此加速了温度较高一侧的材料失效。

从图10和11可以看出:轮胎花纹对轮胎内部热量的快速扩散起到非常重要的作用;光面轮胎和简化花纹轮胎模型左右两侧的温度差异表明由



1—光面轮胎;2—简单花纹轮胎;3—复杂花纹轮胎。

图11 现行方案轮胎在不同行驶速度下的侧向力曲线

Fig. 11 Lateral force curves of current scheme tires under different driving speeds

带束层结构引起的帘布层转向效应导致温度分布具有明显的非对称性;合理的轮胎花纹结构能够有效降低带束层结构引起的侧向力,弱化帘布层转向效应对温度分布的影响,提高帘布端点区域材料的耐疲劳性能。

现行方案轮胎调整花纹后在 $140 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 行驶速度下的温度场分布云图如图12所示。

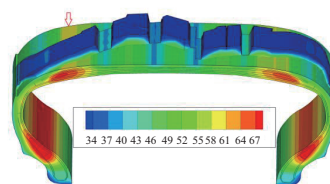


图12 现行方案轮胎调整花纹后在 $140 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 行驶速度下的温度场分布云图

Fig. 12 Distribution nephogram of temperature field after pattern adjustment of current scheme tire under  $140 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  driving speed

从图12与图10(c)可以看出,将非对称轮胎花纹结构左右调换后,左侧胎肩温度明显上升,表明胎面花纹的结构布置需要考虑帘布转向效应的影响,以避免两者相互耦合加速橡胶材料的疲劳失效。

## 4 结论

对复杂花纹轮胎进行了3D温度场建模仿真,探究了带束层结构参数对高速温度场的影响规律,从理论上分析了花纹结构与带束层结构引起的帘布层转向效应相互耦合后延缓或加速材料失

效的机理,得到以下结论。

(1) 轮胎行驶速度越高,内部生热量越大;高速生热与带束层结构参数的相关性从大到小依次为带束层帘线角度、带束层总宽度和带束层帘线经密度。

(2) 在 $60\sim 140\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的轮胎行驶速度区间内,行驶速度每提升 $20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,轮胎各易失效观测点的温度呈阶梯式上升,提升幅度均大于 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,部分设计方案甚至达到 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。

(3) 自由滚动轮胎左右两侧的温度分布呈非对称性,且左右两侧相同观测点的温度差异随着轮胎行驶速度的提高而逐渐增大,温度较高一侧的材料更易疲劳失效。

(4) 轮胎花纹沟槽结构对轮胎内部热量的快速扩散有非常重要的作用,合理的花纹结构能够减缓轮胎高速失效,但胎面花纹结构布置需要考虑帘布转向效应的影响,以避免两者相互耦合加速橡胶材料疲劳破坏。

#### 参考文献:

- [1] 曾光. 计及胎面花纹影响的轮胎侧偏显式有限元分析[D]. 合肥:中国科学技术大学,2009.
- [2] 宁卫明,蒋延华,周茂义,等. 带束层角度对轿车子午线轮胎高速性能的影响[J]. 轮胎工业,2020,40(4):216-218.
- NING W M, JIANG Y H, ZHOU M Y, et al. Effect of belt angle on high-speed performance of PCR tire[J]. Tire Industry, 2020, 40(4): 216-218.
- [3] KIM S, PARK H, MOON B, et al. The prediction methodology for tire's high speed durability regulation test using a finite element method[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 118: 77-86.
- [4] 宋喜岗. 轮胎稳态温度场模型建立与有限元分析[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2012.
- [5] 吴文天. 轮胎温度场的仿真分析[D]. 长春:吉林大学,2017.
- [6] YUKIO N. Advanced tire mechanics[M]. Tokyo: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019: 90-96.
- [7] 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.
- HUANG Z G, LI C Y, MENG X K, et al. FEA optimization design of belt cord for 235/45R18 tire[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(3): 209-213.
- [8] 李景前,徐立,王刚,等. 带束层结构对全钢载重子午线轮胎高速性能影响的有限元分析[J]. 轮胎工业,2015,35(9):524-530.
- LI J Q, XU L, WANG G, et al. Finite element analysis of the effect of belt on high speed performance of truck and bus radial tire[J]. Tire Industry, 2015, 35(9): 524-530.
- [9] 吴福麒. 轮胎稳态滚动温度场的有限元分析[D]. 合肥:中国科学技术大学,2009.
- [10] 张静宜. 子午线力车胎疲劳寿命与滞后生热的有限元计算[D]. 北京:北京化工大学,2017.
- [11] LIN Y J, HWANG S J. Temperature prediction of rolling tires by computer simulation[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2004, 67: 235-249.
- [12] 危银涛,熊志远. 子午线轮胎钢丝帘线受力的参数分析[J]. 轮胎工业,2014,34(8):463-468.
- WEI Y T, XIONG Z Y. Parameter analysis on steel cord force of radial tire[J]. Tire Industry, 2014, 34(8): 463-468.
- [13] 谭品,吴潇,刘肖英,等. 芳纶纤维骨架轮胎的自由滚动数值模拟分析[J]. 轮胎工业,2016,36(4):199-204.
- TAN J, WU X, LIU X Y, et al. Numerical analysis on aramid fiber reinforced tire under free rolling condition[J]. Tire Industry, 2016, 36(4): 199-204.
- [14] CHO J R, LEE H W, JEONG W B, et al. Numerical estimation of rolling resistance and temperature distribution of 3-D periodic patterned tire[J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 50(1): 86-96.
- [15] 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.
- [16] 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的研究[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.
- [17] 胡小玲. 炭黑填充橡胶黏超弹性力学行为的宏观研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2013.
- [18] 尹海山. 轮胎磨损及其温度场的理论与实验研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2017.
- [19] SHAHZAD M, KAMRAN A, SIDDIQUI M Z, et al. Mechanical characterization and FE modelling of a hyperelastic material[J]. Materials Research, 2015, 18(5): 918-924.
- [20] 孟照宏,史彩霞,翟明荣. 轮胎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.

收稿日期:2022-02-22

## Study on Influence of Belt Structure on High-speed Temperature Field of PCR Tire with Complex Pattern

SHI Caixia<sup>1</sup>, MENG Zhaohong<sup>1</sup>, SU Ming<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>, LUO Baoyu<sup>1</sup>, HE Yan<sup>2</sup>

(1. Qingdao Doublestar Tire Industry Co., Ltd., Qingdao 266400, China; 2. Beijing Research and Design Institute of Rubber Industry Co., Ltd., Beijing 100143, China)

**Abstract:** The 3D modeling and high-speed heat build-up simulation analysis of the PCR tire with complex pattern were carried out. The influence of belt structure on the tire high-speed temperature field was studied from the perspective of thermodynamics. The mechanism of delaying or accelerating material fatigue failure by the coupling of cord steering effect and pattern structure was analyzed. The results showed that, the correlation between tire high-speed heat build-up and belt structure parameters was, from large to small, the belt cord angle, the total belt width and the belt cord warp density. In the tire driving speed range under investigation, when the driving speed increased by  $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , the temperature increase of each tire failure observation point was greater than  $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the temperature difference of the same observation point on the left and right sides of the tire model increased with the increase of driving speed. The tread pattern groove structure played a very important role in the rapid diffusion of heat inside the tire, and a reasonable pattern structure could delay tire high-speed failure. However, the structural layout of the tread pattern needed to consider the influence of cord steering effect in order to avoid the mutual interaction between the two which might accelerate the fatigue failure of rubber materials.

**Key words:** PCR tire; complex pattern; belt; high-speed temperature field; cord steering effect; finite element analysis

### 专利3则

由昆明翔鹰机电设备有限公司申请的专利(公布号 CN 113861522A, 公布日期 2021-12-31)“一种耐磨的抗疲劳合成橡胶材料”, 涉及的橡胶材料配方(质量分数)为: 天然橡胶 35~45.5, 丁苯橡胶 19~30, 炭黑 26~33, 氧化锌 2~4.5, 硬脂酸 1~4, 石蜡 2~3, 防老剂 2.2~4.3, 硫黄 1~2, 促进剂 CBS 0.8~1.2。与现有水泥磨机上的橡胶密封圈材料相比, 该橡胶材料的耐疲劳性能和耐磨性能显著提高, 并且具有较好的耐高温性能。

由陕西省石油化工研究设计院申请的专利(公布号 CN 113817240A, 公布日期 2021-12-21)“一种耐天候老化环保丁腈橡胶材料及其制备方法”, 涉及的丁腈橡胶(NBR)材料配方为:

NBR(丙烯腈含量不大于24%) 100, CF炭黑 40~80, 氨基甲烷 5~10, 防老剂 1~3, 环保增塑剂 20~40, 硫化剂 5~15, 促进剂 4~10。该NBR材料具有优异的耐热氧老化性能、耐高温老化性能、耐低温性能和力学性能。

由屈战社申请的专利(公布号 CN 113881116A, 公布日期 2022-01-04)“一种耐油耐腐蚀橡胶及其连续化制备系统”, 涉及的耐油和耐腐蚀胶料配方为: 高饱和丁腈橡胶 60~90, 三元乙丙橡胶 10~20, 纳米高岭土 10~20, 滑石粉 1~3, 白炭黑 1~3, 丁基苯酚甲醛树脂 1~2, 硫黄 0.3~0.8, 二硫化四甲基秋兰姆 1~2。该发明胶料的耐油和耐腐蚀性能大幅提高, 其恒温固化出的产品的使用寿命明显延长。

(本刊编辑部 赵敏)