

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

李景前,徐立,王刚,阙元元

(北京橡胶工业研究设计院,北京 100143)

摘要:以全钢载重子午线轮胎的高速性能为研究对象,从轮胎的结构设计及破坏形式出发,探求轮胎高速破坏机理及破坏规律。采用有限元数值模拟,通过对315/80R22.5规格轮胎的力学分析找出带束层结构设计改变及扁平化与轮胎高速性能之间的对应关系。采用不同带束层结构方案试制了成品轮胎并进行了高速性能试验,通过试验数据和模拟结果的对比分析验证了有限元模拟分析的可靠性和有效性。

关键词:全钢载重子午线轮胎;带束层;高速性能;有限元分析

中图分类号:O241.82;U463.341+.3/.6

文献标志码:A

文章编号:1006-8171(2015)09-0524-07

高速公路具有行车速度快、通行能力大、运输成本低、行车安全舒适等经济技术特点,有利于集约利用土地资源、降低能源消耗、减少环境污染、提高交通安全性,对实现社会经济可持续发展具有积极作用。发达的高速公路网不仅是交通现代化的主要标志,也是一个国家现代化的重要标志。

近年来,高速公路在我国得到了快速发展,极大地提高了我国公路网的整体技术水平,优化了交通运输结构,对缓解交通运输的“瓶颈”制约发挥了重要作用,有力地促进了我国经济发展和 社会进步。

高速公路快速发展的同时,配套设施及装备也应跟上。全钢载重子午线轮胎是新一代载重汽车轮胎,具有高速、耐磨、高载荷、节能环保、使用寿命长等优点。在市场需求拉动和经济利益驱动下,近年来轮胎行业投资发展全钢载重子午线轮胎势头迅猛,但在使用过程中,超载超速严重造成了轮胎的早期破坏,该破坏多发生在胎肩和胎圈部位,为由于结构设计不合理或疲劳作业等原因导致的胎肩脱层和胎圈裂,而且以胎肩脱层居多,因此进行载重轮胎的结构力学分析和高速耐久性性能研究是必要的。

本工作首先对影响全钢轮胎高速性能的因素进行概括论述,然后从轮胎主要承力部件带束层

入手,借用有限元数值模拟手段对315/80R22.5规格轮胎进行分析,找出带束层结构变化与高速性能之间的对应关系,以达到优化轮胎结构设计的目的。最后通过对新方案轮胎的试制进一步验证有限元分析的有效性,以对下一步的改进工作进行指导。

1 高速轮胎的破坏形式和破坏机理

1.1 破坏形式

高速公路上轮胎的破坏多以胎面脱层、胎肩脱层、帘线断裂、橡胶-帘线复合材料间分离、轮胎爆裂等失效形式存在。室内高速试验也多以胎肩脱层类破坏为主,如图1所示。

1.2 破坏机理

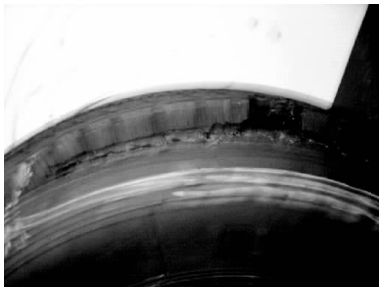
在高速行驶中,轮胎的破坏主要是疲劳破坏和热破坏,且以热破坏为主^[1]。应力集中的存在和均匀性的好坏是重要影响因素。

1.2.1 疲劳破坏

轮胎在滚动过程中橡胶及橡胶基复合材料不断遭受周期性的应力、应变,这种应力、应变达到一定程度时将引起轮胎材料的疲劳破坏。此外,橡胶具有显著的静疲劳——蠕变特征及应力松弛现象,将加速橡胶的疲劳破坏。疲劳破坏的一个明显变化就是模量逐渐减小,松弛的微观解释为交联键的破坏,在应力作用下,分子键被缓慢破坏。由于轮胎制造过程中不可避免地存在微裂纹



(a)胎肩脱层



(b)大面积脱层



(c)带束层脱层



(d)胎面爆破

图 1 高速破坏形式

等内部缺陷,在周期性应力、应变下,微裂纹逐渐扩展,最终在轮胎表面形成裂口,当裂口增大到一定程度时轮胎将破坏失效,如帘线断裂、接头脱开等。疲劳破坏受初始裂纹及工作条件影响较大。机械损伤和空气中臭氧的作用可使橡胶表面出现裂纹,高的工作温度和工作频率均会降低轮胎疲

劳寿命。

1.2.2 热破坏

轮胎是典型的粘弹性复合材料^[2],在交变应力、应变作用下,会产生弹性迟滞损失,以热能的形式存储在轮胎材料中,使轮胎温度上升。当温度上升到一定程度时,轮胎材料的性能、强度以及橡胶-帘线间的粘合力下降,轮胎的行驶性能降低。与此同时,温度上升,腔内气压随之上升,帘线应力增大,当超过极限温度 125 ℃ 时轮胎将产生胎面脱层、掉块、橡胶-帘线复合材料间界面脱离、胎圈爆破等现象。

疲劳破坏和热破坏在轮胎运行过程中同时存在,互相促进,加速对轮胎的破坏。疲劳破坏一般始于初始机械破坏裂口或轮胎材料内部微观裂纹,在周期性应力、应变作用下,初始裂纹逐渐扩展形成较大的宏观裂口。轮胎的生热使材料性能下降,加剧了裂纹的扩展速度。如在裂口处受到机械外力作用,裂口处应力集中剧增,破坏加剧。

1.2.3 应力集中

全钢轮胎的骨架材料为钢丝,钢丝弹性模量很大,达 200 GPa 数量级,而橡胶弹性模量很小,小于钢丝的万分之一。如此悬殊的模量差异会造成轮胎使用过程中界面间应力集中,且当前帘线与胶料间的粘合效果仍有待改善,问题轮胎很多是由界面脱粘造成的。同时,在带束层端部与胎体反包端部因裁断处钢丝帘线没有覆铜,与橡胶粘合效果更差,加之带束层端部处于屈挠变形中心,材料模量梯度的突然变化更加剧了此处的应力集中。这是造成轮胎胎肩脱层的主要原因。

1.2.4 工艺不均匀性

从振动学观点出发,高速行驶时轮胎的不均匀性会增加轮胎受迫振动的激振力,使轮胎变形幅度增大,并产生大量热,从而影响轮胎的高速性能。同时,动平衡指标差也会相应增大振动,不利于高速行驶。轮胎的不均匀性还会产生明显的周期性噪声,增大车辆的燃料消耗,降低轮胎与地面的附着性能以及加速轮胎的疲劳破坏。

因此,生产过程中应该控制好工艺质量,严格按照施工表进行操作,杜绝可能出现的压不实、气泡、硫化不完全等现象。对于高速性能而言,最主要的是保证轮胎具备良好的均匀性和动平衡

指标。

综上分析,总结出轮胎高速下破坏机理,如图2所示。

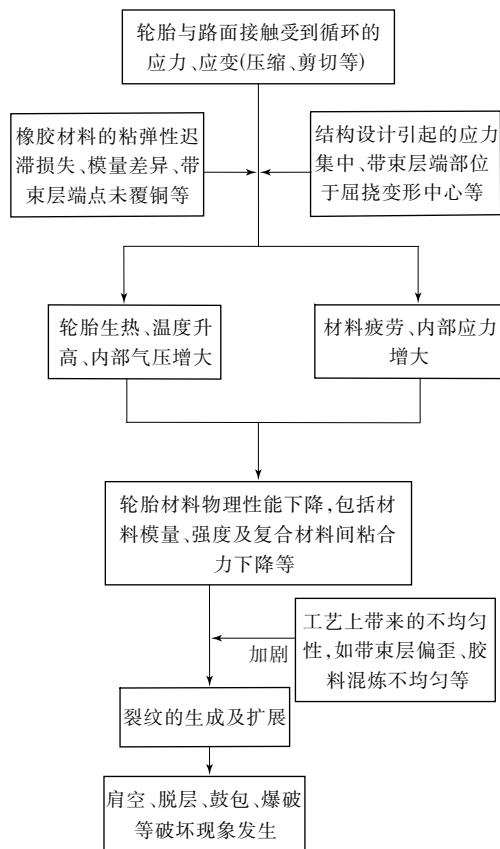


图2 轮胎高速下破坏机理示意

2 结构方案的选择和有限元分析

2.1 结构方案的选择

2.1.1 带束层相关方案

带束层是子午线轮胎的主要受力部件,承受着60%~75%的轮胎应力。带束层对轮胎的耐磨性、行驶稳定性和舒适性均有重要影响,同时对轮胎的法向力、侧向力及纵向力(包括滚动阻力和牵引力等)也起关键作用,其质量好坏还直接影响到轮胎的均匀性和动平衡等指标进而左右轮胎的高速性能。与带束层相关的结构方案的选择主要围绕带束层结构设计展开,除带束层外,其他部位设计参数不变。本研究带束层相关的结构方案有4个。

(1)加大带束层宽度。图3示出了加大带束层宽度前后网格划分对比,通过改变带束层端部

单元的材料等可以方便地实现带束层加宽。本次模拟在原结构基础上加宽了1[#]和3[#]带束层,即缩小了与2[#]带束层的级差。

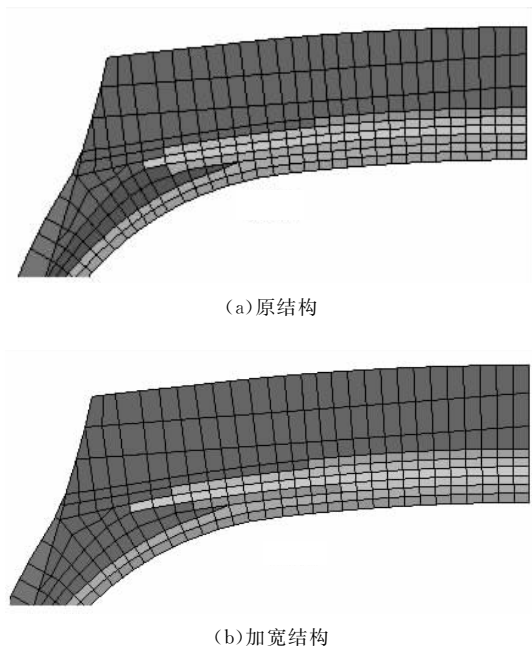


图3 加大带束层宽度前后网格划分对比

(2)改变带束层角度。

(3)改变带束层排列方式(由/ \ / \改为/ / \ \)。带束层排列方式主要影响轮胎的角度效应,不同轮胎厂家为适应不同国家的驾驶习惯或为了追求某种性能,采取不同的带束层排列方式,本方案研究带束层排列方式改变对所选几项性能指标的影响。

(4)改变带束层结构。结构方案(1)~(3)均在4层带束层结构下展开,改变带束层结构方案提出了3种不同于4层带束层结构的子方案(A~C),力图找出不同带束层结构对轮胎性能的影响。图4比较了3种子方案的网格划分和材料分布,因设计中其他部位设计方案未发生变化,故只截取了胎肩与胎冠部分。

A方案结构特点是1[#]带束层断开,设计目的是通过此种方式减小负荷下带束层端部的应变能密度和张应力,并减小胎面冠部质量,有利于轮胎轻量化。

B方案结构特点是胎肩处2[#]带束层上有两层0°带束层环绕,起到箍紧带束层的作用,束缚轮胎在高速旋转时由于离心力作用而产生的轮胎

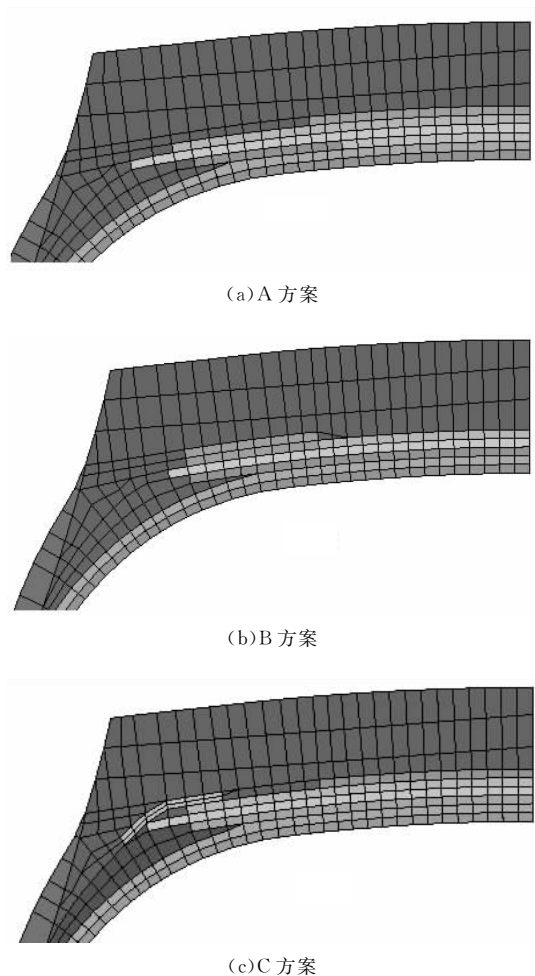


图 4 不同带束层结构的网格划分和材料分布示意

膨胀。

C 方案结构特点是在 4 层带束层结构的基础上,在 2[#] 与 3[#] 带束层端点上缠绕两层锦纶 0°冠带条,在比较锦纶 66 与锦纶 6 的性能差异之后,选取锦纶 66,这两层冠带条减小了钢丝帘线端点与橡胶间的模量梯度,且锦纶 0°冠带条具有特殊的热收缩性,在轮胎生热后能够通过限制带束层端部的位移来降低生热。但鉴于锦纶 66 自身为高生热材料,需平衡两者对轮胎的影响。该种设计在半钢高速轮胎中较为常见,在全钢轮胎中应用较少,这可能与工艺操作难度加大和成本增大有关。

2.1.2 扁平比改变

扁平化是轮胎下一步的发展趋势,本方案选取 315/70R22.5 规格轮胎,并与 315/80R22.5 规格轮胎进行带束层区域应力、应变的对比分析,如图 5 所示。

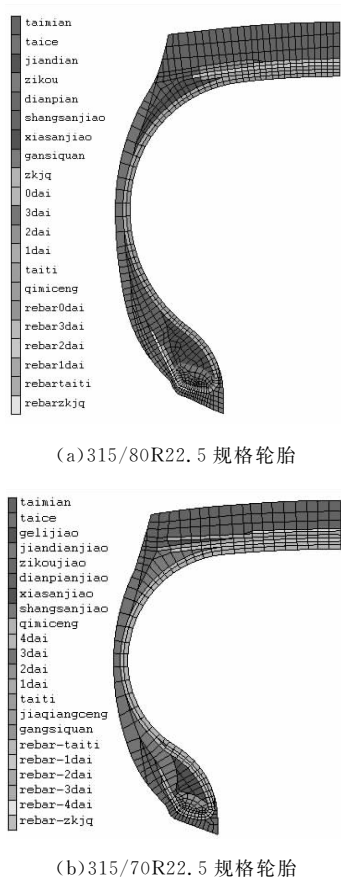


图 5 轮胎材料分布示意

2.2 有限元分析

2.2.1 分析参数的选择

为了衡量轮胎的高速耐久性,选取轮胎接地面积、带束层等效 von Mises 应力、带束层端点的径向位移、单元体的应变能密度和带束层层间剪切应力为参考指标,对各结构方案分别进行有限元建模分析,输出相应的分析结果,并对结果加以对比,如图 6~10 所示,因篇幅所限,图 10 只列出加大带束层宽度方案的分析结果。

2.2.2 结果与讨论

2.2.2.1 带束层相关方案

(1)加宽后带束层端点的 Y 向位移、等效 von Mises 应力、应变能密度及剪切应力均较结构调整前有所增大,说明在 4 层带束层结构中级差过小对轮胎的性能不利,因而应保持至少 10 mm 的级差。

(2)减小带束层角度,端点的 Y 向位移和应变能密度均有所减小,有利于提高轮胎的高速性能,但应注意端点的剪切应力有所增大,会加剧轮胎的早期脱层破坏,且过小的带束层角度在加工

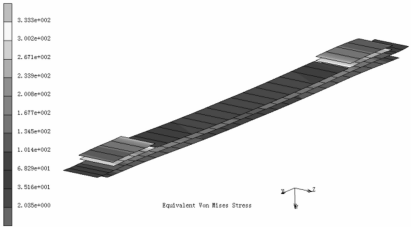


图6 带束层等效 von Mises 应力分布

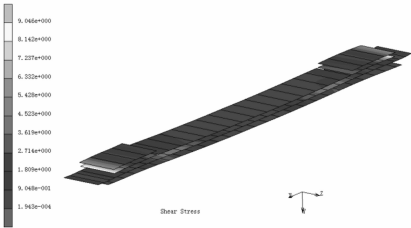


图7 带束层层间剪切应力分布

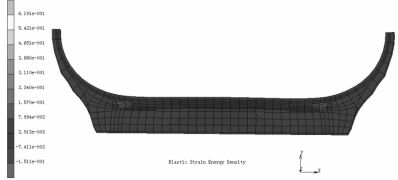


图8 胎肩部单元体的应变能密度分布

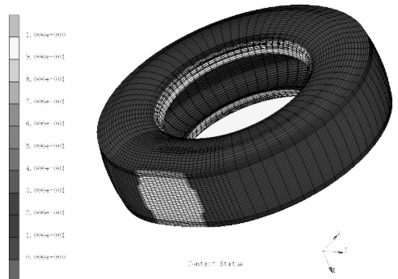
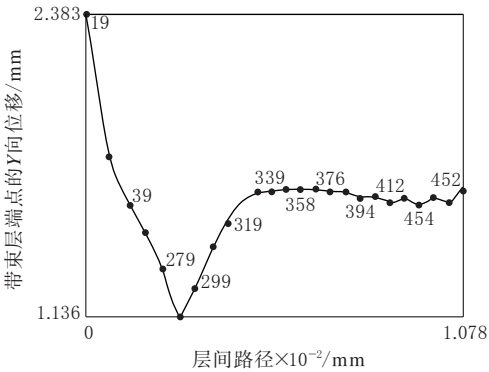
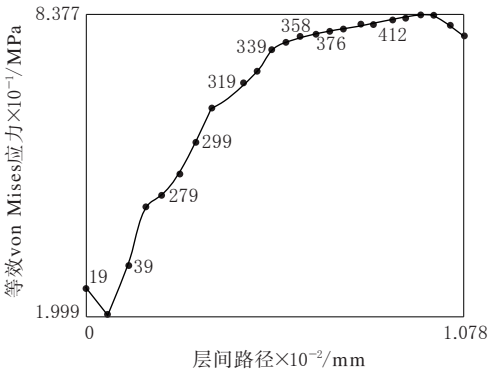


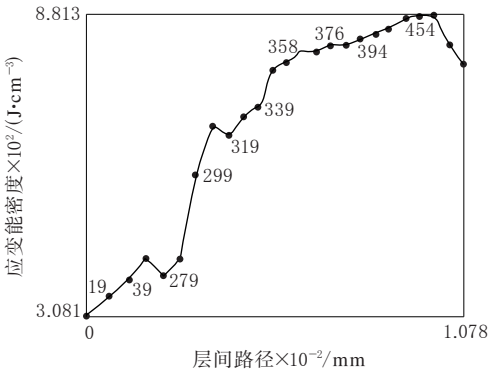
图9 轮胎接地状态



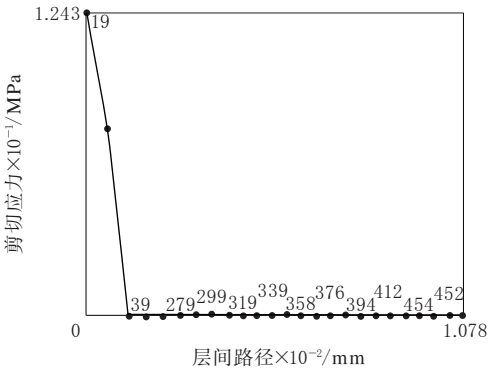
(a)带束层端点的Y向位移



(b)等效 von Mises 应力



(c)应变能密度



(d)剪切应力

图10 带束层层间路径上的受力变形结果

时有一定难度,应平衡影响。

(3)带束层排列方式的改变对所选各项性能指标基本无影响,说明改变带束层排列方式无法提高高速性能。

(4)采用不同带束层结构的轮胎力学性能比较如图11所示。从图11可以看出,相同的轮廓设计,在整个2[#]与3[#]带束层之间的节点路径上,B方案的应变能密度和径向位移均小于其他方

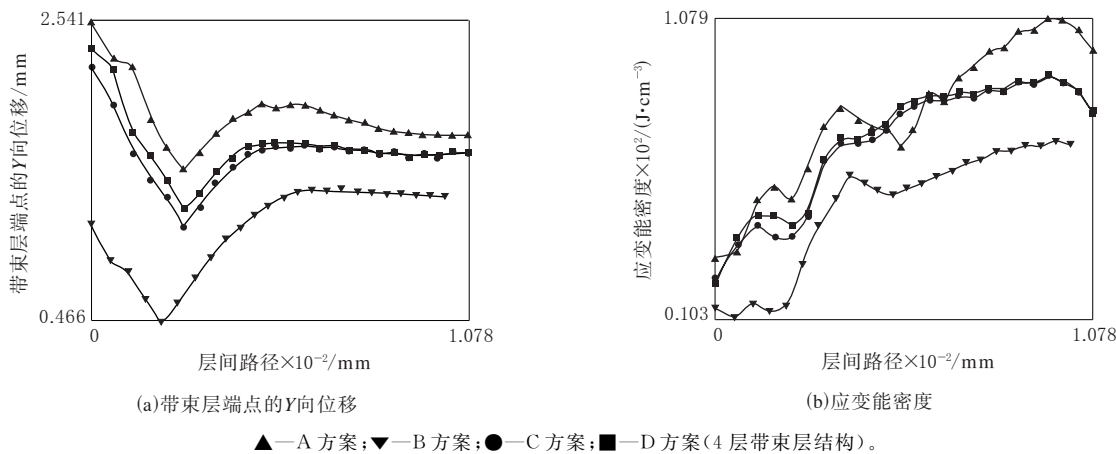


图 11 不同带束层方案轮胎的力学性能比较

案,且在端部节点处最为明显,其他几种方案差别较小。由此可以预测 0°钢丝带束层结构的高速性能最优。

2.2.2.2 扁平比改变

扁平化有利于减小轮胎变形,增大轮胎接地面积,提高行驶稳定性和抓地力,并能降低生热,提高轮胎高速耐久性能。分析得出,315/70R22.5规格轮胎的 4 项指标均小于 315/80R22.5 规格轮胎。

3 试制轮胎高速性能试验

3.1 试验条件

高速性能试验轮胎规格 315/80R22.5,轮胎层级 18PR,速度级别 M,额定负荷 3 750 kg,标准气压 830 kPa,试验气压 830 kPa,设定负荷 3 750 kg,试验分 7 个阶段进行,前 6 个阶段设定时间均为 120 min,设定速度分别为 55,60,70,80,90,100 km·h⁻¹,第 7 阶段设定速度为 110 km·h⁻¹,行驶至轮胎损坏。

3.2 试验结果

高速性能试验结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,高速破坏状况均为胎肩脱层。采用 0°带束层的 B 方案轮胎速度高出一个级别;A 方案轮胎质量有所减小,但高速性能与 D 方案轮胎无大差异;在胎肩部位加了两圈锦纶冠带条的 C 方案轮胎高速性能略有提高,但与 D 方案轮胎仍处在同一个速度级别上,这可能是由于增加了锦纶,轮胎肩部厚度有一定程度的增大,且锦纶帘布本身生热较大,这些因素对轮胎的影响

表 1 高速性能试验结果

项 目	试验方案			
	A	B	C	D
气压/kPa				
开始时	830	830	830	830
结束时	910	1 060	990	1 100
增幅/%	9.60	27.71	19.30	32.53
外直径/mm				
开始时	1 082.8	1 080.6	1 084.0	1 084.1
结束时	1 095.3	1 090.4	1 094.7	1 093.9
增幅/%	1.15	0.91	0.99	0.90
试验时间/h	11.80	14.75	12.60	12.50
破坏状况	胎肩脱层	胎肩脱层	胎肩脱层	胎肩脱层

超过利用热收缩性箍紧轮胎减小变形的影响。

4 结语

围绕带束层的设计(涉及轮胎扁平化问题)对轮胎高速性能的影响展开讨论,利用有限元分析方法得出了结构设计变化与全钢轮胎高速性能之间的对应关系,通过高速性能试验验证了有限元分析的可靠性。后续应用新的钢丝帘线和其他先进复合材料、开发更优的结构使轮胎实现轻量化以及对胎肩部位锦纶冠带层数和宽度的研究等与带束层相关的大量工作可进一步开展。

参考文献:

[1] 赵子亮. 高速滚动汽车轮胎温度场预测模型的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2001.

[2] 杨挺青. 粘弹性力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.

Finite Element Analysis of the Effect of Belt on High Speed Performance of Truck and Bus Radial Tire

LI Jing-qian, XU Li, WANG Gang, QUE Yuan-yuan

(Beijing Research & Design Institute of Rubber Industry, Beijing 100143)

Abstract: The failure mechanism and failure mode of truck and bus radial (TBR) tire under high speed were investigated based on the structure design and damage type. The dependence of high speed performance on the belt structure design and aspect ratio was established by analyzing the mechanical properties of 315/80R22.5 tire using finite element analysis (FEA). The high speed test of finished tires with different belt structure was then carried out and the experimental testing results confirmed that the FEA method was reliable and effective.

Key words: truck and bus radial tire; belt; high speed performance; finite element analysis

大力神推出 Raptis R-T5 超高性能轮胎

中图分类号: TQ336.1; U463.341 文献标志码: D

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntire-dealer.com) 2015年6月15日报道:

大力神轮胎与橡胶公司推出一款全天候超高性能轮胎——大力神 Raptis R-T5 轮胎(见图1)。大力神称该款轮胎将改变人们对“一款具有品牌价值的高性能轮胎能够提供什么”的认知度。



图1 大力神 Raptis R-T5 轮胎

“该 Raptis R-T5 轮胎采用了 Tier 1 和 Tier 2 产品的技术和原材料,这是为什么我们的测试表明该轮胎的销售情况能够与 Tier 1 和 Tier 2 产品并驾齐驱的原因。”大力神营销副总裁 Jedd Emans 称,“我们在 Raptis R-T5 轮胎上倾尽所有,该轮胎是一款展示了大力神价值的真正的明星产品。”

大力神称 Raptis R-T5 轮胎采用先进的原材料和技术,提供了顶级的牵引、操纵和耐磨性能。

该轮胎采用低断面设计,产品系列包含 38 个速度级别为 W、轮辋直径为 432~508 mm (17~20 英寸) 的规格,装配于流行跑车和运动型轿车,如奥迪 A4、宝马 3 系、雪佛兰科迈罗、道奇挑战者、福特野马 GT、福特 Fusion、英菲尼迪 G37、雷克萨斯 IS 250、日产 370Z、斯巴鲁翼豹、大众 GTi 和沃尔沃 S60。

“我们认为大力神 Raptis R-T5 轮胎对经销商而言是一款十分与众不同的轮胎,拥有巨大的获利空间,”Emans 称,“没有其他同级别的轮胎能够提供与 Raptis R-T5 轮胎相当的性能和平顺感。”

Raptis R-T5 轮胎于 7 月在美国上市。

这属于美国轮胎营销公司全资子公司的轮胎制造商称,Raptis R-T5 轮胎包括以下优点和保障。

高级的白炭黑胎面配方和大力神 Evacu-Track 花纹沟提供了更好的湿牵引性能。

3D UltraWave 刀槽花纹和不对称胎面设计提供了优异的操纵性能。

CoolCourse 温度调节系统优化了轮胎性能并延长了轮胎寿命。

具有超高的牵引级别:UTQG (Uniform Tire Quality Gratings) 标志为 500 AA A。

提供 45 000 英里/75 000 km 有限担保,道路意外保障和 30 天 Trust Our Ride 试驾计划。

(马 晓摘译 许炳才校)