

全钢巨型工程机械子午线轮胎轮廓设计方法探索及实践

蔡 庆,何晓玫,张 伟,韩成勇

(北京橡胶工业研究设计院,北京 100143)

摘要:采用形变控制设计方法(Deformation Control Method,DCM)设计全钢巨型工程机械子午线轮胎轮廓,利用有限元技术进行分析优化,并研制出成品轮胎与国外品牌轮胎进行对比试验。全钢巨型工程机械子午线轮胎具有高负荷、瞬间受力大、路面使用条件苛刻等特点,设计上应控制充气时轮廓、带束层端点应力以及胎圈区域的应力应变。有限元分析结果表明,不同负荷下轮胎轮廓变化与 DCM 设想一致,且轮胎最大应力位置始终在肩部带束层端点附近。轮廓测量结果表明,在标准充气压力下,随着负荷率的增大,DCM 成品轮胎的轮廓变化趋势与国外品牌轮胎一致,但国外品牌轮胎的胎面变形更小,断面水平轴下移更小、大负荷下胎侧横向变形率较大。实际应用情况表明,DCM 成品轮胎的使用寿命达到预期国际品牌轮胎的 70% 左右。

关键词:全钢巨型子午线轮胎;轮廓设计;形变控制设计方法;有限元分析

中图分类号:U463.341⁺.5/.6;O241.82 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-8171(2013)10-0579-07

2007 年之前,国际上仅有米其林、普利司通和固特异三大轮胎巨头拥有各自的全钢巨型工程机械子午线轮胎生产技术,且对技术进行严格保密。2008 年以来,国内由北京橡胶工业研究设计院(以下简称北院)牵头,研发了一套全钢巨型工程机械子午线轮胎生产技术,已经应用于全钢巨型工程机械子午线轮胎的开发与生产,经实际使用验证,开发成功的轮胎产品性能接近国际同类产品水平。

全钢巨型工程机械子午线轮胎主要应用于大型露天矿的自卸车辆,使用条件以高负荷、苛刻路面、瞬间受力大为特点,常见的损坏形式有胎冠脱层、胎肩脱层和胎圈裂等。同时,由于全钢巨型工程机械子午线轮胎消耗材料多以及生产成本低,因此要求轮胎可以翻新使用。根据全钢巨型工程机械子午线轮胎的使用特点,需要在控制轮胎充气使用时的轮廓变形、带束层端点应力以及胎圈区域的应力应变前提下,开展轮胎的轮廓设计。

北院通过实践与探索,建立了全钢巨型工程机械子午线轮胎形变控制设计方法(Deformation

Control Method,简称 DCM)。DCM 的关键技术包括预测及控制充气时轮胎轮廓变化、控制轮胎带束层端点应力的变化幅度以及预测并控制胎圈区域应力与应变的变化。目前该方法已经成功应用于 49~57 英寸全钢巨型工程机械子午线轮胎的设计,并可指导开发其他规格产品。本文重点介绍全钢巨型工程机械子午线轮胎开发过程中轮胎轮廓设计方法探索及实践。

1 模型轮廓设计思路

轮胎轮廓通常的设计方法为自然平衡轮廓设计方法^[1],即假设轮胎充气后帘布层帘线所受张力呈均匀分布,以自然平衡轮廓为依据设计的轮胎充气时轮廓变化大致呈均一状态。自然平衡轮廓理论仅考虑力的平衡,是用内压决定轮胎形状的方法,与轮胎实际情况有较大差距。

根据全钢巨型工程机械子午线轮胎的使用特点,DCM 的设计思想为:在遵循自然平衡轮廓设计方法的基础上,基本不改变原设计轮胎内部结构及材料分布,通过调整模型轮廓设计使充气后的轮胎轮廓变形尽可能减小。轮廓变形应达到设计理念预期的胎面、胎侧和胎圈变形量,并使轮胎胎体充气时的形状变化控制在最小范围内,从而

作者简介:蔡庆(1977—),女(彝族),贵州纳雍县人,北京橡胶工业研究设计院高级工程师,学士,主要从事轮胎结构设计工作。

实现轮胎各部位的变形、接地形状、应力以及接地压力分布等性能有效保持到轮胎使用结束,有效保证轮胎翻新后能继续使用。

轮廓设计时,与传统设计轮廓相比,采用DCM设计轮廓具有行驶面平坦化、胎肩部位弧曲率半径平直化、反弧设计和下胎侧部位曲率增大的特点,以达到以下效果。

- 在轮胎充气过程中,胎圈部位的曲率半径较大,充气后向轮胎外侧变形,往外扩张,使得胎圈部位帘布层张力较大,并且胎圈的弯曲刚度增大,使负荷下的胎圈变形较小,减轻胶料的疲劳,提高胎圈的强度和耐久性能。

- 胎肩部位充气后向轮胎里侧变形收缩,由于胎面变形较小而胎肩变形下移,使得胎面更加平坦化,带束层中心部位与端部的应力差降低。轮胎胎面形状平坦化,达到接地压力均匀,提高轮胎的耐磨性能,降低轮胎生热,大大提高轮胎的行驶里程。轮胎胎面平坦化设计有利于巨型轮胎的多次翻新使用。

- 上胎侧的防擦台设计主要是加强胎侧保护,使其免受矿石割伤。

按照这样的设计思路,结合全钢子午线轮胎的设计经验,设计的轮胎模型外轮廓如图1所示。内轮廓设计仍然以自然平衡轮廓理论为基础进行计算,但关键点如胎冠中心厚度、胎肩厚度和胎圈防水线处厚度等参数选取,则考虑实际使用要求并经过有限元优化确定。

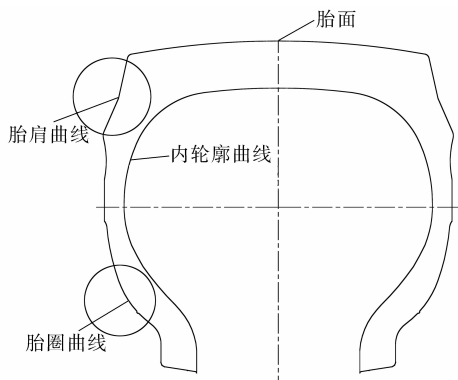


图1 轮胎断面轮廓示意

2 有限元技术对DCM设计优化分析

开发全钢巨型工程机械子午线轮胎过程中,

应用有限元技术对DCM设计进行优化分析,并考察轮胎在不同负荷下的变形和受力情况。

有限元分析建立的轮胎结构静态分析模型如图2所示。在该模型中,考虑了轮胎变形的几何非线性、轮胎与压板之间的大变形非线性接触、橡胶材料的不可压缩性以及钢丝帘线复合材料的各向异性。

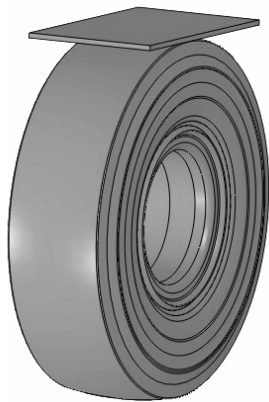


图2 轮胎三维数学模型

分析做了如下假设:

- 材料参数为常数,在各类负荷作用下不变,不考虑温度的影响;
- 不考虑花纹,只考虑光滑胎面;
- 作用在轮胎上的负荷仅与轮胎变形有关,轮胎充气压力作用在轮胎胎里表面的法向;
- 轮胎与轮辋无相对移动。

2.1 材料模型

橡胶是构成轮胎的最主要材料,与普通金属材料不同的是,橡胶的力学行为复杂。橡胶受力后变形过程非常复杂,伴随着大位移、大应变,而橡胶本身又是非线性材料,构成了几何非线性和材料非线性的双重非线性。在全钢巨型轮胎的模拟分析中,橡胶材料采用超弹性本构模型——Mooney-Rivlin模型进行模拟^[2],建立了橡胶材料应变能密度函数:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3)$$

式中 W ——应变能密度;

C_{10} 和 C_{01} ——Rivlin 系数;

I_1 和 I_2 ——第1和第2 Green 应变不变量。

帘线材料模型采用了线弹性正交各向异性

模型^[3]。

2.2 二维断面网格模型

对三维数学模型中压板与胎面接触的断面进行边界接触处理并离散化,生成网格,如图 3 所示。模拟分析条件为:充气压力 700 kPa,负荷率 65%,85%,100%和 110%。

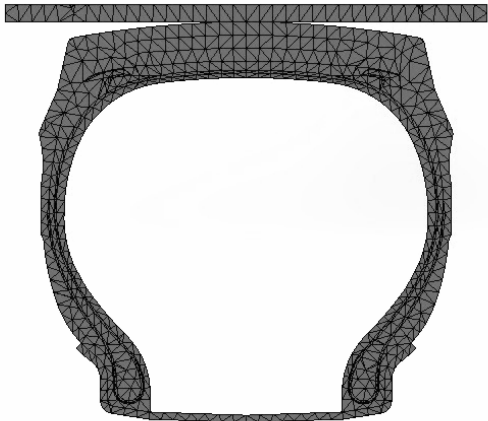
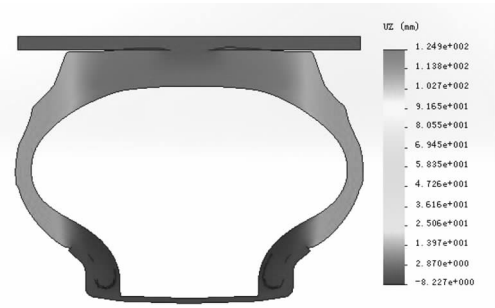


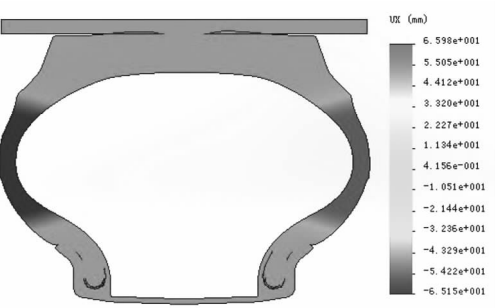
图 3 二维断面网格模型

2.3 有限元分析结果

利用有限元分析得到不同负荷下轮胎轮廓位移变化如图 4~7 所示,不同负荷下轮胎材料应力分布如图 8~11 所示。

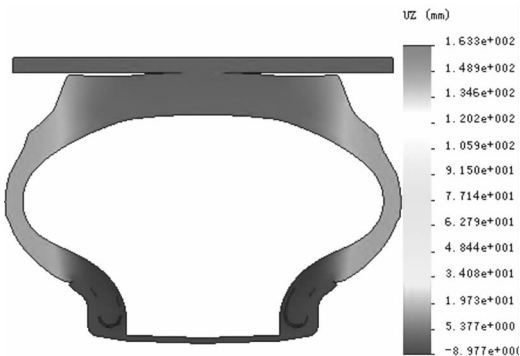


(a)纵向

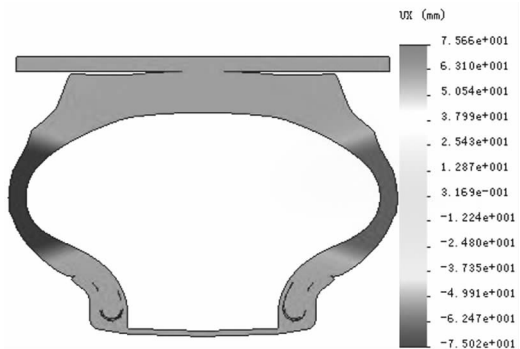


(b)横向

图 4 负荷率为 65%时轮胎断面变形量

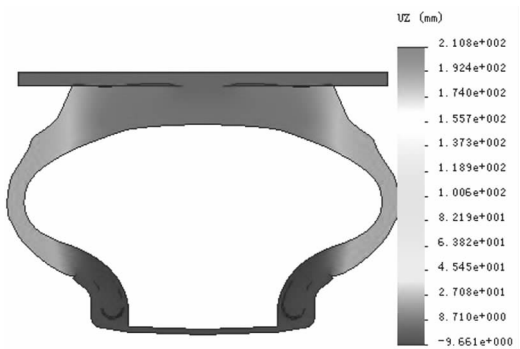


(a)纵向

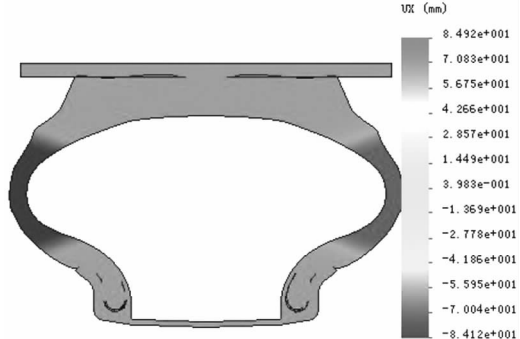


(b)横向

图 5 负荷率为 85%时轮胎断面变形量

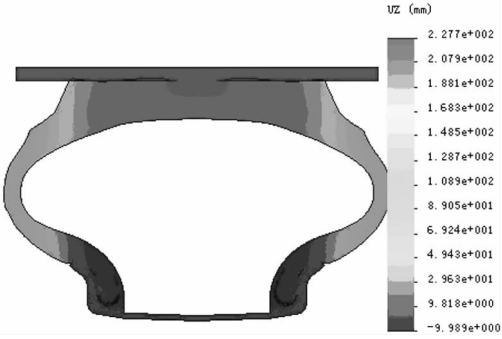


(a)纵向

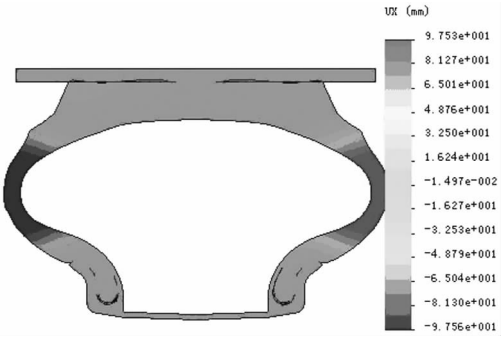


(b)横向

图 6 负荷率为 100%时轮胎断面变形量



(a)纵向



(b)横向

图7 负荷率为110%时轮胎断面变形量

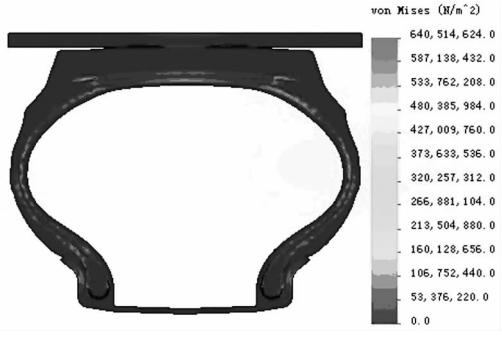


图8 负荷率为65%时轮胎材料应力分布

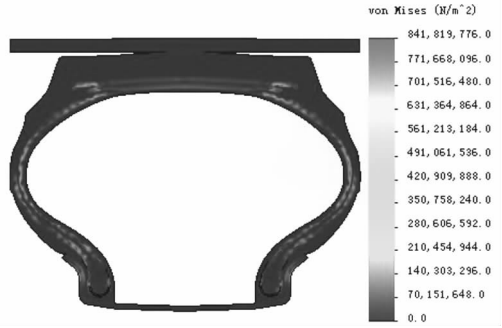


图9 负荷率为85%时轮胎材料应力分布

从图4~11可以看出,随着负荷率的增大,轮胎的变形趋势与DCM设想基本一致,且轮胎最大应力位置始终在肩部带束层端点附近。根据



图10 负荷率为100%时轮胎材料应力分布



图11 负荷率为110%时轮胎材料应力分布

有限元分析结果,对轮胎模型轮廓设计进行优化,使优化结果更有利于减少胎肩部位应力集中。

3 轮胎充气轮廓实测对比分析

按照DCM并结合有限元优化设计开发了57英寸全钢巨型工程机械子午线轮胎(以下简称BY品牌轮胎),在5m转鼓试验机上进行轮廓测量,测量条件为标准充气压力(700kPa)和变负荷(负荷率分别为0,65%,85%,100%和110%),测量工具为激光关节臂测量仪,测量结果如下。

3.1 充气轮廓与模型轮廓对比

轮胎在标准充气压力、无负荷条件下测量得到的轮廓曲线如图12所示。

从图12可以看出,相对于轮胎模型轮廓,在标准充气压力下,轮胎充气轮廓胎肩部位曲线往里收,胎圈部位曲线往外扩,行驶面轮廓和断面宽基本不变,轮胎外直径和断面宽变化量远小于相应标准规定的新胎允许膨胀范围,说明轮胎轮廓变形极小。为了更好地考察全钢巨型工程机械子午线轮胎的轮廓变化,引入胎肩曲线弧半径(R_1)变化率和胎圈曲线弧半径(R_2)变化率2个参数。经过测算,57英寸某规格全钢巨型工程机械子午线轮胎的充气外缘尺寸各主要膨胀率参数为:直

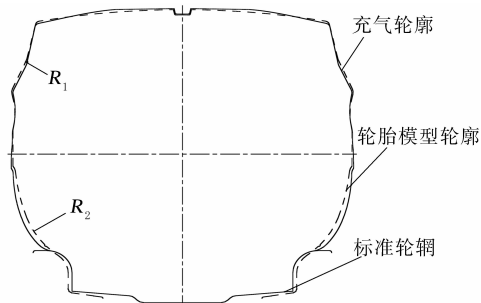


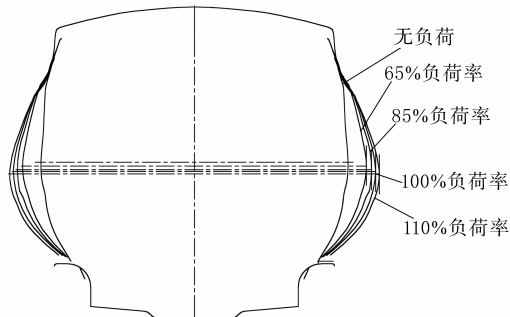
图 12 标准充气压力、无负荷条件下轮胎充气轮廓与模型轮廓对比

径膨胀率 0.2%，断面宽膨胀率 0.9%，行驶面收缩率 0.1%， R_1 变化率 -26%， R_2 变化率 +12%。

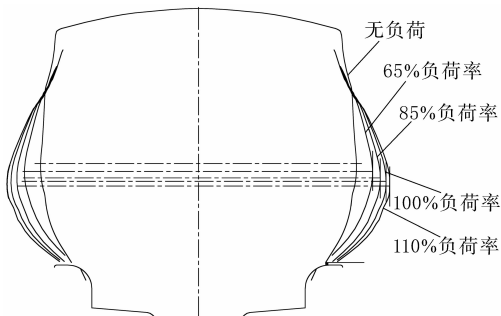
3.2 BY 品牌轮胎充气轮廓与国际品牌轮胎对比

按照 DCM 开发的 BY 品牌轮胎与国际品牌 (ML 品牌) 轮胎进行同条件 (标准充气压力为 700 kPa, 变负荷) 测量对比。同时, 为建立转鼓上测量数据与实际平面接触地面数据的关系, 将测量分为 2 组, 即转鼓测量和平板测量, 得到的轮胎充气轮廓曲线如图 13 和 14 所示。

从图 13 和 14 可以看出: 随着轮胎负荷率的逐



(a) 平板



(b) 转鼓

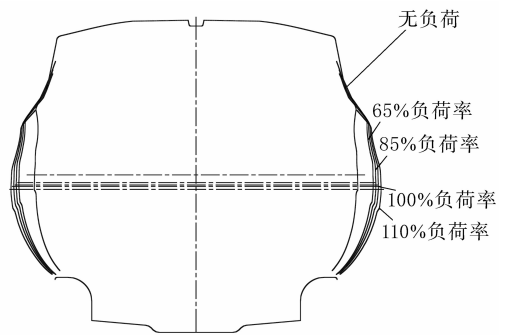
图 14 不同负荷下 ML 品牌轮胎充气轮廓曲线

步增大, 无论是平板还是转鼓测量得到的轮廓曲线, 轮胎断面水平轴均逐渐下移, 断面宽逐渐增大, 两者变化趋势一致; 相同条件下, 转鼓测量得到的变形数值比平板测量小; 随着轮胎负荷率的逐步增大, BY 品牌轮胎的轮廓变化趋势与 ML 品牌轮胎一致, 但变化率更大。由于平板测量方式与路面使用情况更为相近, 因此在以下讨论中轮胎轮廓曲线以平板测量数据为依据。

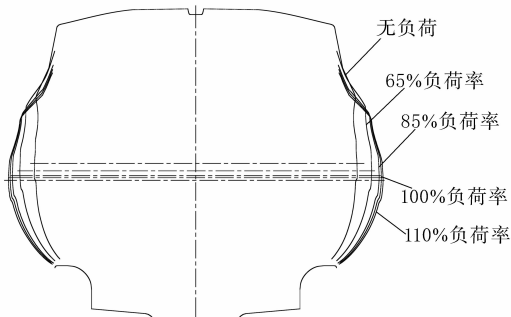
将轮胎有限元分析结果、BY 品牌轮胎与 ML 品牌轮胎机床实测结果进行对比, 得到轮胎断面宽变形量、下沉量和断面水平轴下移量的对比曲线分别如图 15~17 所示。

从图 15 可以看出: 对于 ML 品牌轮胎, 模拟得到的力学分析曲线与实测曲线变化趋势相同, 随着负荷率的增大, 轮胎断面宽逐渐加大; 在负荷率达到 85% 后, ML 品牌轮胎的变化斜率明显增大; 在负荷率接近 100% 后, ML 品牌轮胎的断面宽变形量大于 BY 品牌轮胎, 说明 ML 品牌轮胎在满负荷使用及瞬时超负荷时, 胎侧水平轴横向变形较大。

从图 16 可以看出: 相同负荷下, ML 品牌轮

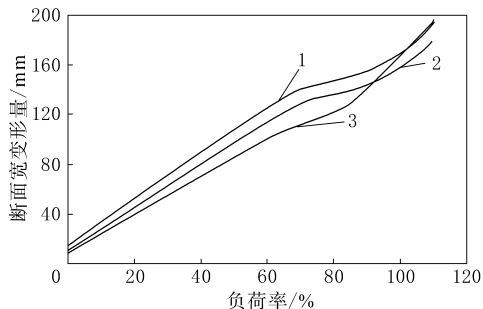


(a) 平板



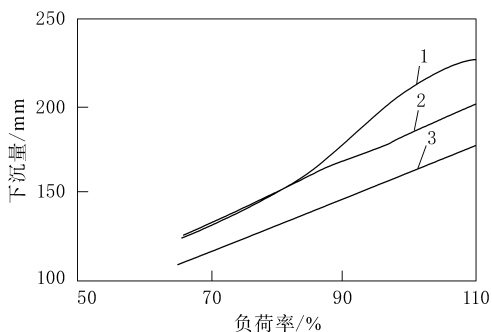
(b) 转鼓

图 13 不同负荷下 BY 品牌轮胎充气轮廓曲线



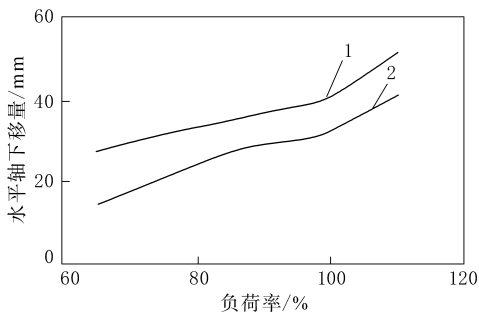
1—模拟曲线;2—BY 品牌轮胎;3—ML 品牌轮胎。

图 15 负荷下轮胎横向断面宽变形量



注同图 15。

图 16 负荷下轮胎下沉量



1—BY 品牌轮胎;2—ML 品牌轮胎。

图 17 负荷下轮胎断面水平轴下移量

胎下沉量比 BY 品牌轮胎小;对于 BY 品牌轮胎,在负荷率达到 85% 以上时,模拟的力学分析结果与实测结果偏离较大。

从图 17 可以看出,在相同负荷率下,ML 品牌轮胎的断面水平轴下移量比 BY 品牌轮胎小。

由上述分析结果可知,在实际使用中,ML 品牌轮胎轮廓变形趋势与 BY 品牌轮胎一致,但 ML 品牌轮胎的胎面变形更小,断面水平轴下移更小、大负荷下胎侧横向变形率较大,说明 ML 品牌轮胎的轮廓变形控制更优,因此推断 ML 品牌轮胎的使用寿命更长,翻新率更高。

4 结论

(1)利用有限元方法预测全钢巨型工程机械子午线轮胎的轮廓变化,以保证轮胎形变的可控,即胎面平坦变形小、胎侧中部变形较大、胎圈变形小是 DCM 的重要组成部分。

(2)在全钢巨型工程机械子午线轮胎研发过程中有限元模拟结果与实测结果接近,且变化趋势完全相同,表明前期设计轮廓曲线时采用有限元模拟分析的方法计算出较为合理的轮廓曲线是可行的。

(3)北院研发的全钢巨型工程机械子午线轮胎在标准充气压力、不同负荷条件下的轮廓变形趋势与国际品牌轮胎一致,但国际品牌轮胎胎面变形更小,断面水平轴下移更小、大负荷下胎侧横向变形率较大,轮胎使用寿命更长,翻新率更高。

(4)北院研发的全钢巨型工程机械子午线轮胎在大型露天煤矿、铁矿、铜矿等国内外矿山使用已达 4 年以上,大部分轮胎的寿命达到预期国际品牌的 70% 左右,说明 DCM 方法可行。

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, 2005: 104-106.
- [2] 王友善, 王锋, 王浩. 超弹性本构模型在轮胎有限元分析中的应用[J]. 轮胎工业, 2009, 19(5): 277-282.
- [3] 俞洪, 丁剑平, 顾学甫, 等. 轮胎帘线/橡胶复合材料弹性常数的测试研究[J]. 轮胎工业, 2001, 21(4): 195-200.

收稿日期: 2013-06-13

Exploration and Application of Design Method for Profile of All-steel Giant Off-the-road Radial Tire

CAI Qing, HE Xiao-mei, ZHANG Wei, HAN Cheng-yong

(Beijing Research and Design Institute of Rubber Industry, Beijing 100143, China)

Abstract: The profile of all steel giant off-the-road radial tire was designed by using the deforma-

tion control method (DCM) and optimized by finite element analysis (FEA). The finished tire was tested comparing with an international brand tire. Based on the characteristics of high load, large instantaneous stress and very harsh road conditions, the tire profile in inflating state, stress at the belt end, and the stress and strain of the tire bead should be controlled in the design. The FEA results showed that, under different load, the trend of profile change was consistent with the DCM design, and the maximal stress position was always around the belt end in tire shoulder. The measurement results showed that, under the standard inflation pressure, with the increase of loading rate, the trend of profile change of DCM finished tire was similar to that of the international brand tire, but the international brand tire had smaller tread deformation, less drop of the horizontal axis position, and bigger lateral deformation rate of sidewall under large load. The application test results showed that the life of DCM finished tire reached about 70% of the international brand tire.

Keywords: all-steel giant off-the-road radial tire; profile design; deformation control method; finite element analysis

倍耐力静音轮胎成为奥迪

RS6 和 RS7 原配胎

中图分类号: TQ336.1 文献标志码: D

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntire-dealer.com)2013 年 7 月 17 日报道:

倍耐力的“降噪系统”技术轮胎(如图 1 所示)成为奥迪 RS6 和 RS7 车型原配胎。



图 1 倍耐力“降噪系统”技术轮胎

倍耐力 Pirelli & Cie 公司开发出了为奥迪集团设计的新型轮胎,可减少车内噪声。这是位于米兰的倍耐力公司第 1 次提供倍耐力“降噪系统”原配胎,可降低轮胎行驶噪声。这种噪声是轮胎挤压路面时被压缩的空气振动所引起的,噪声从轮胎传到轮毂,最终通过操纵和悬架系统传到车内。

倍耐力“降噪系统”在轮胎内部使用聚氨酯海绵,以吸收振动,从而减少车内噪声。它可使噪声降低 2~3 dB,改善了驾乘舒适性。

倍耐力的研究测试证明,这种降低噪声的海绵对轮胎其他特性没有任何影响。

倍耐力称,这项技术引入原配胎,迎合了汽车

界对降低汽车内部和外部噪声不断增长的需求,并满足欧洲最新法规关于减少噪声污染的要求。

倍耐力“降噪系统”轮胎已成为奥迪 RS6 和 RS7 原配胎,轮胎规格分别为 285/30ZR21 和 275/30ZR21。使用该系统的轮胎在胎侧标识有“PNCS”。

(吴淑华摘译 李静萍校)

轮胎硫化机装胎机构抓胎器

中图分类号: TQ330.4+7 文献标志码: D

由桂林橡胶机械厂申请的专利(公开号 CN 202640623U,公开日期 2013-01-02)“轮胎硫化机装胎机构抓胎器”,涉及的轮胎硫化机装胎机构抓胎器包括同轴设置的固定盘和转动盘、以及由转动盘控制爪片张合的抓放胎机构。抓放胎机构包括推杆、连杆和滑套,滑套于固定盘内滑动安装于径向导杆上,竖状推杆滑动配合于滑套内,推杆上端置于转动盘上开设的弧形槽内,爪片的片体铰装于向下伸出固定盘的推杆下端,设于推杆外侧的连杆下端铰连爪片主动端,爪片的从动端为爪头,连杆上端铰连滑套;转动盘置于与固定盘同轴设置的升降气缸缸体上。该设备利用升降气缸作为动力,推动抓胎器爪片实现张开闭合动作,平稳可靠,没有偏心力矩,保证了抓胎器转动盘的平行度和抓胎器动作的重复精度。

(本刊编辑部 马 晓)