

全钢巨型工程机械子午线轮胎胎圈结构设计

蔡庆, 韩成勇, 徐立

(北京橡胶工业研究设计院, 北京 100143)

摘要:采用有限元模拟方法对全钢巨型工程机械子午线轮胎胎圈的受力情况进行分析,包括胎圈-轮辋配合紧密度、钢丝圈安全性、充气后胎圈轮辋接触情况、胎圈轮辋法向应力分布、胎圈 Von Mises 应力分布、负荷下轮胎胎圈接触情况,并进行胎圈优化设计,使胎圈受力状况合理,胎圈过盈配合恰当,并保证轮胎的气密性。

关键词:全钢巨型工程机械子午线轮胎;胎圈;结构设计;过盈配合;有限元分析

中图分类号:U463.341⁺.5/.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-8171(2015)06-0328-08

近年来,我国在全钢巨型工程机械子午线轮胎(以下简称全钢巨胎)的研发上取得突破性进展,产品从无到有,短短几年间全钢巨胎的生产制造工艺基本成熟,轮胎质量迅速提升,迄今全钢巨胎产品已经覆盖了49~63英寸全系列逾30个规格品种,产品在国内外多个大型露天矿山使用。在自主研发的全钢巨胎制造技术中,结构设计工作尤为重要,轮胎轮廓的设计、材料形式的选择、生产设备工艺参数的确定等难点问题被逐一克服。

全钢巨胎胎圈设计是其结构设计的重要内容之一,胎圈部位与轮辋直接接触,胎圈需要过盈设计,以保持轮胎牢固地落座于轮辋上^[1]。另外,胎圈应具有足够刚性,才能在轮胎行驶中将动态屈挠变形转移至胎侧,并保障车辆行驶的稳定。同时,胎圈设计还应考虑刚性胎圈与较为柔软胎侧之间的良好过渡,以防止胎圈局部应力集中,导致胎圈裂口、折断、起鼓、材料脱层等损坏。

在研发过程中,采用有限元模拟方法对全钢巨胎胎圈受力情况进行分析,并对多方案进行比较,优选出胎圈-轮辋配合紧密度适当、胎圈轮辋接触情况良好、钢丝圈安全倍数合理、胎圈各部分材料应力梯度合理的方案,进行轮胎的试制和试用。本工作从胎圈轮廓设计、胎圈材料分布设计等几个方面对全钢巨胎的胎圈结构设计进行梳理

总结。

1 胎圈轮廓设计

1.1 轮廓充气变形特点及设计思路

全钢巨胎在露天矿山非公路路面使用,具有速度低和负荷高的特点。其外形为高宽比0.85以上的圆形轮廓,与一般子午线轮胎相似,全钢巨胎的主要受力部位为具有多层环形带束层的胎冠及胎圈,由此进行轮胎的整体设计,从刚性对比上看,胎冠-胎侧-胎圈区域依次为刚性-柔性-刚性的过渡设计。轮胎轮廓示意图见图1。

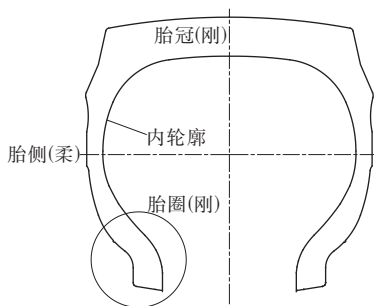


图1 轮胎轮廓示意

对全钢巨胎的研究发现,控制轮胎充气时的形状变化以减小材料的应变,对于提高轮胎的耐久性有很大帮助,由此总结出全钢巨胎形变控制设计方法 DCM 方法(Deformation Control Method),按照 DCM 设计的轮胎轮廓充气前后的变化如图2所示,其特点如下。

(1)行驶面设计平坦化,下胎肩部位弧曲率半径(R_1)较大,采用较平直反弧设计。轮胎在充气

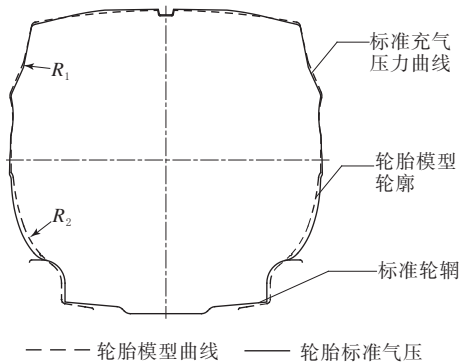


图 2 轮胎充气前后轮廓变化

状态下,胎肩部位向轮胎里侧变形收缩,由于胎面变形较小而胎肩变形下移,使得胎面平坦度增大,接地面积加大,接地压力更均匀,有效提高了轮胎的耐久性。

(2)胎圈部位轮廓设计,使胎圈弧曲率半径(R_2)增大,胎圈整体变形减小,减小了胶料位移,从而降低该部位胶料的疲劳,提高胎圈耐久性^[2]。另外,设计还使胎圈处帘布层张力更大,这同样能降低胎圈变形,使胎圈的刚性增大,提高胎圈耐久性。

(3)上胎侧设计突出的防擦台,其作用为减少轮胎胎肩下部位的变形,从而减轻该部位帘线形变和受力,并防止胎侧受矿石刮伤。

1.2 胎圈过盈设计及胎圈轮廓

1.2.1 胎圈过盈设计思路及方案

全钢巨胎胎圈与轮辋的过盈配合相当重要,过盈设计主要与胎圈轮廓及钢丝圈布置相关,使轮胎装配在轮辋上时,对轮辋产生一定的箍紧力,保证胎圈与轮辋接触位置的气密性。轮胎胎圈部位过盈设计不当,将影响轮胎正常使用,若过盈力偏小,轮胎与轮辋配合不紧密。使用中的轮胎胎圈示意图 3。

胎圈在使用过程中慢慢泄气,导致轮胎负荷能力逐渐下降及轮胎受力发生改变,造成轮胎损坏。若过盈力偏大,则会出现装、卸轮胎困难,并且使钢丝圈受力过大,严重时可能发生钢丝圈损坏,影响车辆的安全性。直接影响胎圈过盈力和钢丝圈安全倍数的参数有:胎圈着合直径(d_t)、胎圈底部倾斜角度(α_t)、钢丝圈圈数、钢丝圈中心半径(r)及钢丝圈位置等。

以 57 英寸轮胎 A 和 B 两方案为例讨论全钢

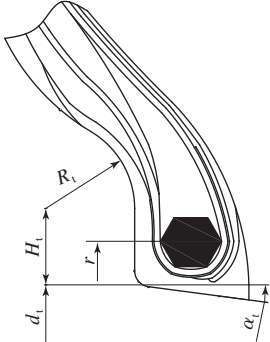
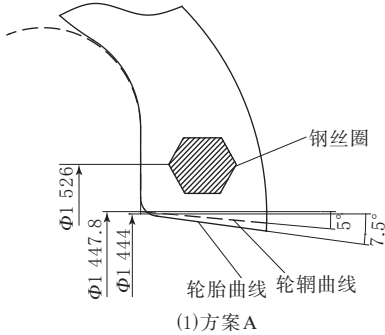


图 3 使用中的轮胎胎圈示意

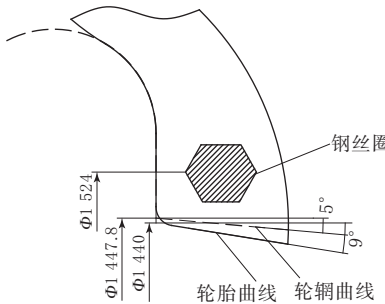
巨胎过盈设计,方案 A 沿袭斜交巨胎的经验设计,其过盈量设定较小,胎圈底部角度较小,设计较为保守。考虑到全钢巨胎胎圈宽度较小,应在不影响装卸轮胎前提下,采用更大的过盈量以保障胎圈气密性。因此,方案 B 采用了较大的过盈量和胎圈底部角度设计,具体参数如表 1 所示。胎圈部位与轮辋相叠加的配合情况见图 4。

表 1 方案 A 和 B 全钢巨胎过盈设计

项 目	方案 A	方案 B
d_t/mm	1 444	1 440
r/mm	1 526	1 524
$\alpha_t/(\text{^\circ})$	7.5	9.0
轮辋标定直径(d_w)/mm	1 447.8	1 447.8
轮辋底部斜角(α)/($\text{^\circ}$)	5	5



(1)方案 A



(2)方案 B

图 4 胎圈部位与轮辋相叠加的配合情况

1.2.2 过盈设计的计算

1.2.2.1 经验计算

利用轮胎设计指导公式,计算两种方案的钢丝圈压力(T)、钢丝圈过盈量(T_t)、钢丝圈所受总压力(T_δ)以及钢丝圈安全倍数(K)。根据子午线轮胎的一般设计经验,钢丝圈安全倍数取 2.5~4.0倍。计算结果表明方案 B 的钢丝圈安全倍数在合理取值范围。计算公式如下。

$$T = \frac{0.1P(R_K^2 - r_0^2)}{2} \quad (1)$$

$$T_t = \frac{Ebr\delta_T}{2t} \quad (2)$$

$$T_\delta = T + T_t \quad (3)$$

$$K = nS_n / T_\delta \quad (4)$$

式中, P 为轮胎内压,kPa; R_K 为胎里半径,cm; r_0 为零点半径,cm; E 为钢丝圈下部材料的平均弹性模量,一般为 30~50 MPa; b 为钢丝圈宽度,cm; δ_T 为胎圈对轮辋的过盈量,cm; t 为钢丝圈底部材料厚度,cm; n 为钢丝圈数; S_n 为单根钢丝强度,N。

根据上述公式计算得出方案 A 和 B 钢丝圈的安全倍数分别为 5.2 和 3.8。

1.2.2.2 有限元模拟分析

本次有限元分析采用的橡胶本构模型为超弹性 Mooney-Rivlin 模型,帘线为正交各向异性材料模型。有限元模拟结果显示,充气状态下,两种方案轮胎与轮辋都能充分接触,接触区内胎圈与轮辋的界面压力主要集中在轮辋边缘和胎圈底座上。比较而言,方案 B 的法向接触应力更均匀地分布在轮辋底部,而方案 A 的法向接触应力更多作用在轮辋上。两种方案轮胎充气后与轮辋的接触情况和法向接触应力分别如图 5 和 6 所示。

从图 5 和 6 可以看出,方案 A 胎圈受力分布不如方案 B 均匀,且方案 A 胎圈内侧受力更集中。胎圈上的 Von Mises 应力分布如图 7 所示。

从图 7 可以看出,方案 B 轮胎与轮辋的接触更均匀地分布于轮辋底部,轮胎的气密性和行驶安全性更好。而方案 A 轮胎与轮辋的接触更偏向于轮辋边缘,且负荷状态下接触范围变化更大。

1.3 胎圈过盈设计实际效果

基于前述胎圈过盈力计算及有限元模拟分析结果,选用 B 方案生产轮胎在国内露天铁矿和

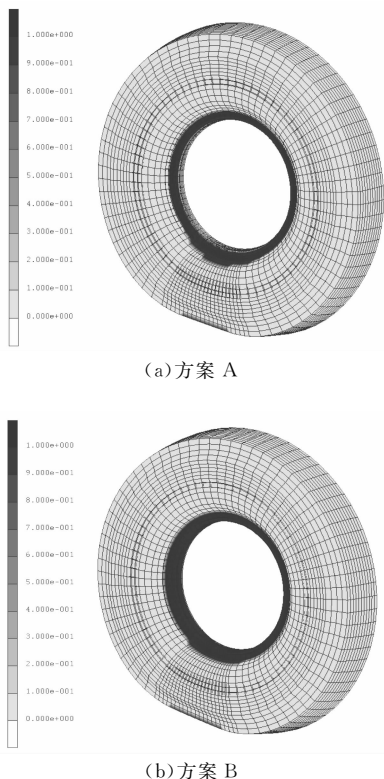


图 5 两种方案轮胎充气后与轮辋的接触情况

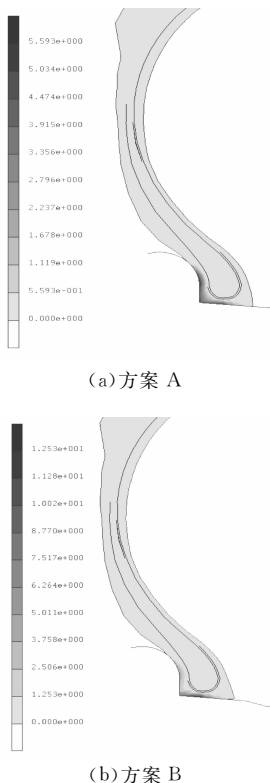
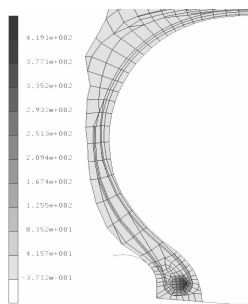
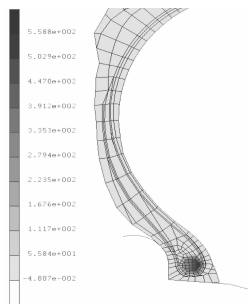


图 6 两种方案轮胎充气后与轮辋的法向接触应力
铜矿装车使用,轮胎安装顺利、拆卸轮辋容易,轮



(a) 方案 A



(b) 方案 B

图 7 两种方案胎圈上的 Von Mises 应力分布

胎气密性与进口轮胎相当,使用过程中,气压正常无泄漏。在全钢巨胎的胎圈过盈设计中,与传统斜交巨胎的设计相比,采用较大的过盈量及底部角度设计是合理可行的。

2 胎圈材料分布设计

全钢巨胎的胎圈应具有足够的刚性、稳定性以及与胎侧良好的刚性过渡,该部位由多个部件组成,结构复杂。按材料类型可分为骨架材料和橡胶部件两类。骨架材料包括六角形钢丝圈、胎体帘线、钢丝补强层、锦纶补强层。橡胶部件包括下三角胶、胎圈护胶、上三角胶、胎圈填充胶、胎侧胶。骨架材料及硬质橡胶用于保证胎圈刚性,设计采用了形状合理、强度大的钢丝圈、钢丝补强层、多层锦纶补强层、硬度高的三角胶和胎圈护胶,同时采用硬度较低的橡胶部件进行形状填充,从而达到性能要求。胎圈部结构如图 8 所示。

2.1 胎圈部位骨架材料对其刚性的影响

2.1.1 骨架材料基本形式的确立

(1)胎体反包高度(H)的确立。全钢巨胎胎体反包高度位于水平轴附近,这与全钢载重轮胎及中、大型全钢工程机械轮胎有很大区别,之所以

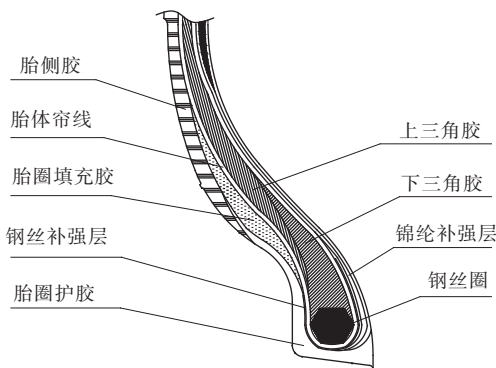


图 8 全钢巨胎胎圈部结构

将胎体延伸至水平轴高度,一方面原因是全钢巨胎负荷高,车辆运行时轮胎反复屈挠,胎侧变形大,需要加强胎侧强度,避免轮胎的疲劳损坏和双胎并用时发生胎侧挤压;另一方面原因是外胎体向上延伸,避开在胎圈处成为应力集中端点,从而避免轮胎胎圈损坏的情况发生。

在额定负荷、标准充气压力条件下,采用不同胎体反包高度进行模拟计算,轮胎变形情况显示,随着胎体反包高度的增大,轮胎下沉量逐渐下降,横向变形逐渐减小。胎体反包高度及其对变形和下沉量的影响如图 9~11 所示。

(2)多种骨架材料的搭配。胎圈部位采用合适的骨架材料搭配形式,才能达到其刚性要求。对比各种方案的力学分析与实际试验,最终采用了“钢丝圈+胎体+钢丝补强层+锦纶补强层”方案进行生产。在额定负荷、标准充气压力下,不同骨架材料形式轮胎的位移对比如图 12 所示,不同负荷率下, A 点(见图 9)位移对比如表 2 所示。

从图 12 和表 2 可以看出,胎体+锦纶补强层+钢丝补强层结构胎圈口部位刚性加强,受力情况下变形较小,有利于提高耐疲劳性能。

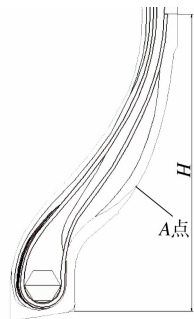
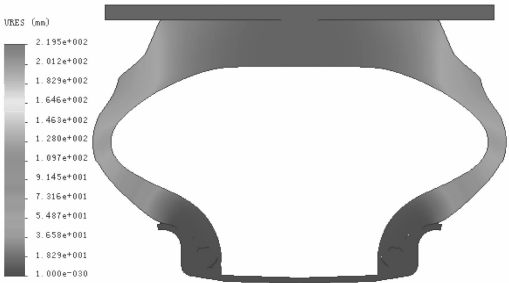
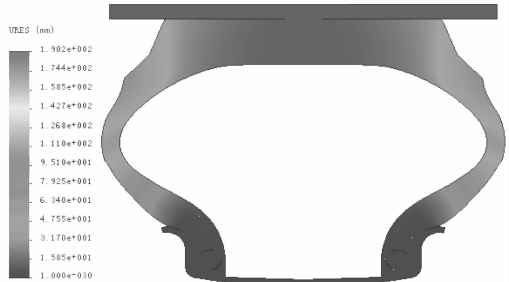


图 9 胎体反包高度示意



(a)反包高度 240 mm



(b)反包高度 530 mm

图 10 胎体反包高度对轮胎变形的影响

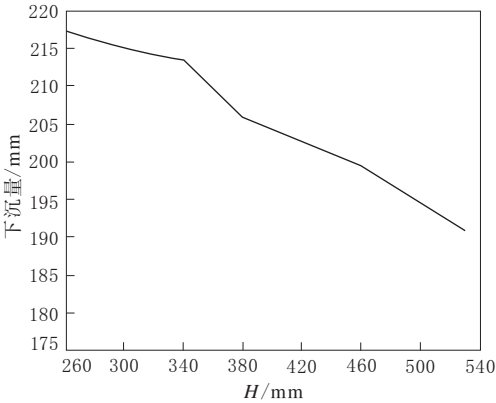
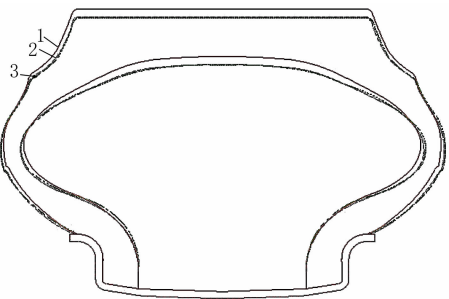


图 11 下沉量与胎体反包高度的关系



轮廓:1—钢丝圈+胎体+钢丝补强层+锦纶补强层;
2—钢丝圈+胎体+钢丝补强层;3—钢丝圈+胎体。

图 12 在额定负荷、标准充气压力下不同骨架材料形式轮胎的位移对比

表 2 不同骨架材料形式 A 点的位移对比 mm

负荷率/%	轮廓 1	轮廓 2	轮廓 3
65	40	42	43
85	43	46	47
100	47	48	50
110	48	54	58

2.1.2 钢丝补强层端点位置

钢丝帘布内外端点落在胎圈的不同高度处,其应力有较大变化,将该部位划分为高应力区域和相对安全区域,合理选择端点位置,使钢丝补强层端点尽量落在安全区域。据此设计的钢丝补强层外侧端点在轮缘高度以下。

胎圈钢丝补强层外端点高度(h)和应力变化如图 13 和 14 所示。

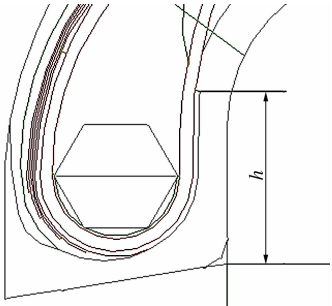


图 13 胎圈钢丝补强层外端点高度示意

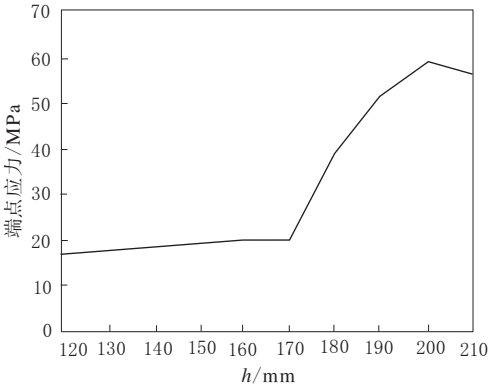


图 14 胎圈钢丝补强层外端点应力变化

2.1.3 锦纶补强层设计

采用多层附胶锦纶补强的设计,使钢丝补强层内端点应力应变降低,保护钢丝补强层内端点,减少该端点出现裂纹而导致轮胎内裂发生的现象,另外使胎圈充气变形减小,达到提高胎圈刚性的目的。图15所示为不同骨架材料分布的胎圈应力分布,图16所示为不同骨架材料分布的胎圈口部位变形情况。

2.1.4 钢丝圈设计

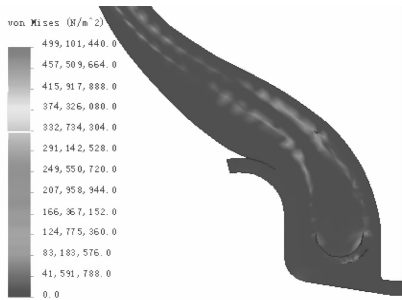
钢丝圈采用正六角形结构,强度高,工艺成熟,能保障胎圈底部与轮辋的良好接触,使胎圈与

轮辋紧密配合。钢丝圈圈数的选择以其安全倍数(一般为 2.5~4.0)为依据,钢丝圈排列以高宽比 0.8~1.0 性能较佳。

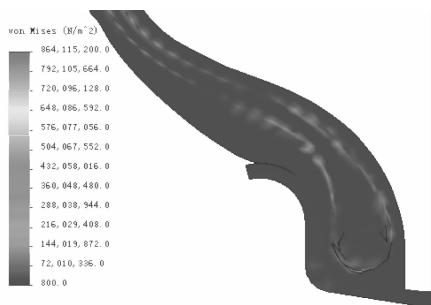
2.2 胎圈部位各胶料对胎圈性能的影响

除了骨架材料,胎圈部位各胶料对胎圈性能起重要作用,在胶料设计方面,采用高硬度的下三角胶、钢丝包胶及胎圈护胶是提高胎圈刚性的必要手段。胶料硬度从大至小排列顺序为:下三角胶、胎圈护胶、钢丝包胶、帘布胶、胎侧胶、胎圈填充胶、上三角胶。其中,与钢丝圈结合的下三角胶的硬度最大,形成胎圈部分强有力的支撑部件,下三角胶较大的硬度对于半成品挤出造成一定困难,若由于下三角胶的硬度高不易挤出而降低其硬度,将影响胎圈的刚性和轮胎的变形。力学分析考察胎圈的变形情况,若下三角胶的硬度降低 10%,则轮胎变形增大大约 6%~8%。

为保障轮胎整体性能,通过改进下三角胶的配方和挤出工艺,解决高硬度胶料的挤出问题。其次,钢丝包胶硬度高,与钢丝圈钢丝的附着性好,形成一体。胎圈护胶与轮辋直接接触,也具有较高的硬度及良好的耐磨性能,可有效防止磨损及胎圈裂口。硬度较低的几种胶料,与刚性材料形成过渡,另外还具有各自的特点,胎侧胶与胎圈护胶接壤,其耐屈挠性、耐气候性和耐臭氧老化性较好。上三角胶与下三角胶相邻,其屈挠性好、生热低。胎圈填充胶具有柔软性好、生热低和弹性好的特点,各种胶料之间在物理性能上有很好的性能过渡匹配。不同下三角胶硬度的轮胎变形情况如图 17 所示。

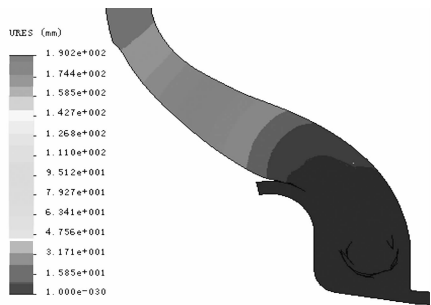


(a) 胎体+钢丝补强层+锦纶补强层

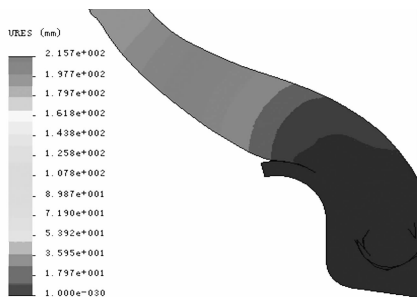


(b) 胎体+钢丝补强层

图 15 不同骨架材料分布的胎圈应力分布



(a) 胎体+钢丝补强层+锦纶补强层



(b) 胎体+钢丝补强层

图 16 不同骨架材料分布的胎圈口部位变形情况

3 胎圈应力梯度

轮胎受到内压和负荷作用,胎圈部位不同材料所产生的应力不同,应力合理过渡使轮胎能更持久地运转。关于全钢巨胎的胎圈部位,根据经验提出合理的应力梯度应包括关键轴线的应力变化和关键部位的应力变化。

分别选取轮胎水平轴位置(轴线 1)、过渡区对比位置(轴线 2)、轮辋点位置(轴线 3)、胎圈-轮辋接触点位置(轴线 4)作轴线,分别考察轴线上

胶料及骨架材料的应力分布,如图 18 所示。

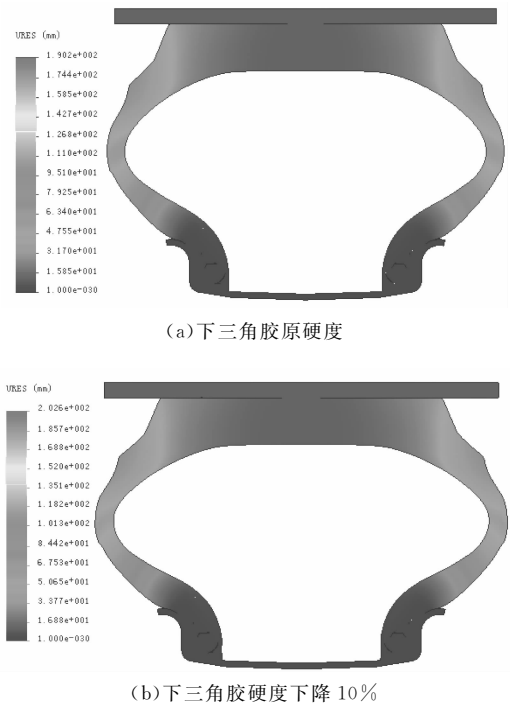


图 17 不同下三角胶硬度的轮胎变形情况

对于不同的设计方案,其关键轴线的应力分布呈现不同状态,关注全钢巨胎使用中损坏机率大的薄弱位置,如轴线 3 的 f 点、轴线 1 的 d 点等,在合理范围使其应力尽可能减小,该处应力梯度随之减小,从而提高轮胎的使用寿命。某规格全钢巨胎胎圈关键轴线应力梯度示意图 19。

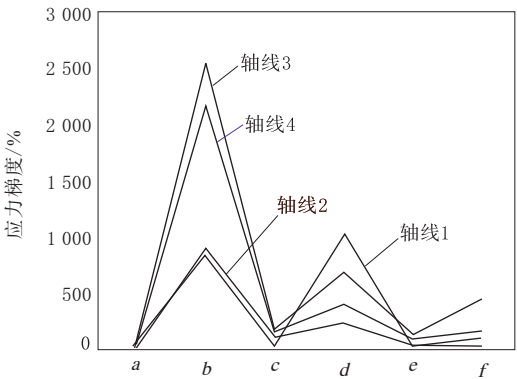


图 19 某规格全钢巨胎胎圈关键轴线应力梯度示意

4 结论

全钢巨胎的胎圈设计遵循整体刚性足够、过盈恰当、材料合理过渡等原则,从胎圈轮廓设计、胎圈材料分布等方面对其进行设计。所设计的各规格品种轮胎在各大露天矿区使用已达 5 年,使用情况良好,轮胎密封效果好、轮辋装卸容易、气密性保持率高、轮胎胎圈处损坏较少,根据实际使用情况,认为全钢巨胎的整体设计开发成功,其胎圈设计合理。

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,2005:149-151.
[2] Gent A N, Walter J D. 轮胎理论与技术[M]. 危银涛,李勇,冯希金,等. 译. 北京:清华大学出版社,2013:150.

2014 年国际橡胶会议(北京)论文

Bead Structure Design for Giant All-steel Off-The-Road Radial Tire

CAI Qing, HAN Cheng-yong, XU Li

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

Abstract: In this paper, the pressure distribution of the bead in giant all-steel off-the-road radial tire was analyzed by using finite element analysis method. This study included the closeness between

bead and rim, safety of bead ring, contact between bead and rim after inflation, normal pressure on bead and rim, Von Mises stress distribution on bead, and contact between bead and rim under load. The design of bead was optimized. As a result, the pressure distribution was optimized, the interference fit of the bead and the rim was better, and the air tightness of the tire was good.

Key words: giant all-steel off-the-road radial tire; bead ring; structure design; interference fit; finite element analysis

2015 橡胶新技术、新材料论坛 在青岛举办

中图分类号: TQ33 文献标志码: D

2015 年 4 月 9—10 日, 由山东省橡胶行业协会主办的 2015 橡胶新技术、新材料论坛在山东省青岛市举办。来自橡胶新材料、橡胶制品和橡胶机械生产企业等单位的代表参加了此次论坛。

论坛上, 山东省橡胶行业协会会长张洪民做了主题为“2014 年山东省橡胶行业运行情况 & 面临的机遇与挑战”的报告。报告指出, 山东省橡胶工业经过多年快速发展, 虽已成为全国橡胶工业第一大省, 但大而不强的矛盾依然突出, 伴随国际贸易保护日趋严重, 轮胎行业市场压力不断增大。2014 年山东省橡胶行业实现销售收入 4 051.58 亿元, 同比增长 11.38%, 增幅较 2013 年回落 3.62 个百分点, 利润 268.99 亿元, 同比增长 7%, 增幅较 2013 年下降 12.3 个百分点, 今后低速增长将成为新常态。他强调, “创新思维, 转型升级”将成为 2015 年山东省橡胶行业的主基调。

随着国外经济的深度调整, 加上国际贸易保护主义严重, 我国轮胎遭遇了美国“双反”调查, 国内外市场压力不断加大, 将对我国乘用车轮胎出口造成严重影响。在国外市场, 中国轮胎的主要优势在于价格低廉, 因此, 削弱我国轮胎市场竞争力的有效办法为提高关税。美国是我国轮胎出口的最大市场, 2014 年下半年以来, 美国“双反”的影响已经显现。数据显示, 我国出口美国的轮胎从 2014 年 11 月开始出现较大幅度的下降, 其中 11 月同比下降 21.9%, 12 月同比下降 43.3%。我国轮胎出口美国受阻, 其他国家可能会效仿美国, 从而引发一系列连锁反应。尽管很多企业正采取开发新兴市场等积极措施, 但短期内难以

见效。

2014 年 12 月 31 日, 《复合橡胶通用技术规范》推荐性国家标准正式发布, 并于 2015 年 7 月 1 日起正式实施。标准确定复合橡胶生胶质量分数不大于 0.88。该标准对国内天然橡胶产业起到了一定的保护作用, 但同时也提高了橡胶加工企业的生产成本和工艺难度, 意味着橡胶加工企业需进行配方调整, 并重新进行产品试验, 且原有的橡胶加工设备和工艺将不再适用。因此, 轮胎企业的生产成本也随之提高, 对正在受到美国“双反”影响的中国轮胎企业而言, 该标准的实施无疑是雪上加霜。

在我国轮胎行业整体增速放缓的大背景下, 轮胎行业需寻求新标准下复合橡胶的出路 & 生产对策。对此, 与会嘉宾与企业代表进行了互动交流, 认为国内轮胎企业应转变生产方式, 注重产品升级, 加快工艺创新, 着重提高轮胎的功能性和附加值。轮胎行业发展应该更加注重先进性、实用性和环保性, 才能促进技术水平提高, 并提升市场占有率。加强品牌建设、控制产能、提高科技创新能力以及创新营销模式将是推动我国橡胶工业发展的指导方针。此次论坛上, 国家橡胶轮胎质量监督检验中心主任马良清以米其林轮胎为例, 结合轮胎检测与使用过程中出现的问题, 预测了全钢子午线轮胎的发展趋势, 报告实用性较强, 反响强烈。

本次论坛重点关注和讨论中国橡胶行业未来的发展和运行情况, 特别是天然橡胶复合橡胶新标准下的生产对策, 同时介绍了橡胶行业的新技术、新材料、新工艺以及废橡胶的资源化措施, 为全国橡胶行业搭建了重要的交流和沟通平台, 有利于促进中国橡胶工业技术水平的提高。

(本刊编辑部 孙斯文 田军涛)