

起重机专用445/80R25 ETCRANE工程机械轮胎有限元优化设计及产品性能改善

印海建, 孟庆伟, 潘国徽, 孙熙林, 刘本鑫

[泰凯英(青岛)专用轮胎技术研究开发有限公司, 山东 青岛 266100]

摘要:针对高速场景下起重机轮胎胎肩脱层、生热问题,运用有限元分析方法建立纵向花纹445/80R25工程机械轮胎有限元分析模型,进行数值分析和优化及产品性能改善。通过对比分析原始方案轮胎刚性和接地数据的仿真结果与实测结果,验证有限元模型的准确性;优化胎肩部位材料分布,在此基础上采用不同带束层结构方案对胎肩部位受力进行有限元分析,优化带束层端点受力状态。结果表明:胎肩和胎里曲线优化后的B3带束层方案(1[#]—4[#]带束层宽度分别为165,103,138和123 mm)轮胎胎肩部位受力状态最优,达到改善设计目标;B3方案轮胎的耐久性能比原始方案轮胎提升17%,接地印痕矩形率增大,耐磨性能提升;海外目标客户测试显示,B3方案轮胎早期行驶10 000 km无胎肩脱层问题,达到改善目标。

关键词:起重机轮胎;工程机械轮胎;胎肩脱层;生热;有限元分析

中图分类号:U463.341⁺.5/.6;O241.82

文献标志码:A

文章编号:1006-8171(2023)11-0659-05

DOI:10.12135/j.issn.1006-8171.2023.11.0659



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

近年来,我国工程机械车辆的快速发展增强了基础建设能力。在风力发电、桥梁、高速公路、化工产业园等建设中,全路面起重机车辆作为基建吊装场景的重要组成部分发展迅猛。随着吊装要求的提升,对起重机起吊能力的要求越来越高,例如要求445/80R25全路面起重机轮胎兼顾非铺装路面的抗切割和牵引制动性能与高速公路转场的高速性能和低生热性能。轮胎在行驶过程中微观上的橡胶分子链内摩擦表现为宏观上的滞后生热^[1-2]。市场上起重机轮胎故障多为胎肩生热脱层。

熊春明等^[3-6]对轮胎生热的数值分析进行了研究,取得一些突破。但目前针对高速工程机械轮胎的生热研究相对较少,工程机械轮胎尺寸较大,实际试验成本较高,更适合采用有限元方法进行分析验证。

本研究针对工程机械领域起重机轮胎在高速场景下出现的胎肩脱层和生热问题,运用有限元

方法建立全路面起重机专用纵向花纹445/80R25工程机械轮胎有限元分析模型,进行结构设计数值分析和优化及产品性能改善。

1 轮胎仿真模型的建立

1.1 材料模型的选取

工程机械子午线轮胎因为负荷较大,多采用全钢设计,主要由钢丝帘线、钢丝圈和不同配方的橡胶部件组成。部分胎圈部位负荷要求较高的轮胎,例如井下矿专用轮胎在轮胎胎圈采用多层锦纶包布进行反包以增强胎圈部位刚性。

在有限元模型建立时,不同材料采用不同的模型和处理方式。对于超弹性橡胶材料,考虑到超弹性材料的非线性和本构模型的收敛性,本研究采用Yeoh模型。对于胎体和带束层等的骨架材料,采用加强筋的方式进行定义。轮辋和路面简化为解析刚体^[7]。

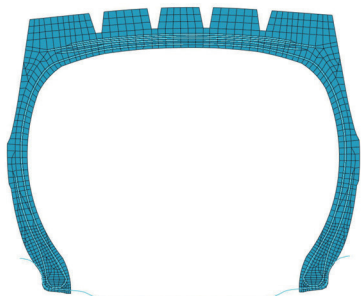
1.2 三维模型的建立

本研究采用旋转指令进行三维模型建立,首先建立轴对称模型,通过施加胎趾钢丝圈位移边界条件实现轮胎与轮辋的装配,并对轮胎进行充气仿真。

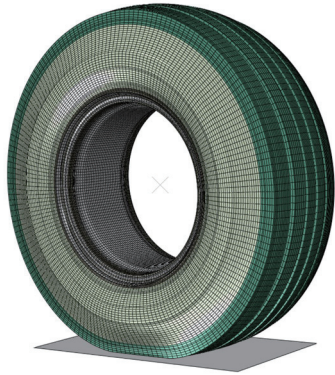
作者简介:印海建(1987—),男,江苏如皋人,泰凯英(青岛)专用轮胎技术研究开发有限公司工程师,学士,主要从事工程机械轮胎结构设计工作。

E-mail:hikin.yin@techking.com

轮胎断面进行网格划分时,考虑到带束层端点为主要破坏点,应保证带束层端点单元及邻近单元均为四边形且需细化网格密度,带束层网格尺寸控制为2 mm。同时考虑胎圈部位与轮辋过盈接触,适当细化胎圈部位网格密度。轴对称截面模型单元总数为1 736个(其中加强筋486个),网格划分如图1(a)所示。纵向花纹轮胎的三维模型沿周向划分为180等份,见图1(b),生成的三维几何模型有312 480个单元。



(a)轴对称模型



(b)三维模型

图1 轮胎轴对称模型和三维模型

1.3 有限元模型及验证

对有限元模型施加700 kPa标准充气压力和6 000 kg标准负荷,原始方案轮胎外缘尺寸仿真结果与实测数据对比如表1所示,接地数据仿真结果与实测数据对比如表2所示。接地中心长度、接地胎肩长度、肩系数和接地中心宽度模拟值与实测值的相对误差分别为0.9%、1.1%、2.4%和0。

从表1和2可以看出,原方案轮胎的有限元分析结果与实测结果一致,相对误差小于3%,验证了有限元模型的准确性。本研究建立的纵向花纹轮胎三维模型在静负荷试验中基本满足精度要求,

表1 原始方案轮胎外缘尺寸仿真结果与

实测数据对比

项 目	模拟值/mm	实测值/mm	相对误差/%
充气外直径	1 339	1 340	0.07
充气断面宽	448	450	0.44
充气冠中外周长	4 206	4 210	0.07
标准负荷下断面宽	498	500	0.40
标准负荷下下沉量	55	55	0

表2 原始方案轮胎接地数据仿真结果与实测数据对比

项 目	模拟值	实测值
接地中心长度/mm	338	335
接地胎肩长度/mm	272	275
肩系数 ¹⁾ /%	80	82
接地中心宽度/mm	370	370

注:1)接地胎肩长度与接地中心长度的比值。

未细化实际花纹块,花纹饱和度与实际存在一定差异,故在接地试验对比中,暂不考虑净接地面积和平均接地压力的对比结果。

2 胎肩材料分布优化

2.1 设计方案

起重机轮胎需要兼顾非公路和高速场景,高速场景的挑战主要反映在轮胎的肩部性能。445/80R25 ETCRANE轮胎主要适用于东南亚和澳洲等海外市场,通过调研显示其市场病象反馈以胎肩脱层为主,占比为80%以上。

通过调整胎肩垫胶、内衬层和胎体曲线,对胎肩材料分布进行优化。两种胎肩材料分布方案对比见图2,S2为胎里过渡调整方案。

2.2 初始和边界条件

在完成轮胎的轴对称分析之后,采用旋转指令完成轮胎三维模型的建立和结果传递。在标准

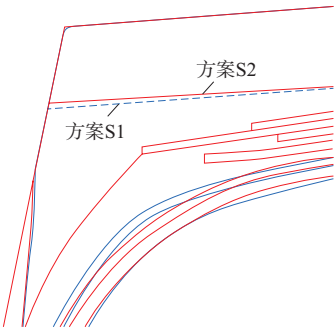


图2 不同胎肩材料分布方案

充气压力和标准负荷条件下,采用路面加载的方式等效轮胎实际加载。

2.3 胎肩性能对比

通过分析胎肩脱层的轮胎发现,损坏位置多集中于带束层端点。分析认为,高温下硫化橡胶性能下降,带束层端点屈挠引起损坏,故障轮胎剖析也能看到带束层端点处有胶料粉末。由于应变能是应力应变积分和,某些单元可能应变较小但应力很大,因此对特定区域不仅进行应变能的比较,还进行应力分析。高速行驶的轮胎易损部位为胎肩带束层接头集中区域,带束层结构优化可以实现胎肩刚性平稳过渡,减小因刚性急剧变化导致的应力集中,同时胎肩脱层也是肩部的主要损坏形式之一,因此还应进行层间剪切的综合分析。

轮胎胎肩部位性能采用此区域内应变能密度、Mises应力和周向剪切应变(+LE13和-LE13,方向相反)的极值来综合评估,如表3所示。

表3 S1和S2方案轮胎胎肩部位力学性能

项 目	S1方案	S2方案
应变能密度/($\text{mJ} \cdot \text{mm}^{-3}$)	0.447	0.383
Mises应力/MPa	2.963	2.736
周向剪切应变极值/%		
+LE13	0.416	0.422
-LE13	-0.473	-0.456

注:Mises应力和周向剪切应变的极值出现在2[#]带束层端点及2[#]带束层与1[#]带束层夹胶位置。

从表3可以看出,与S1方案轮胎相比,S2方案轮胎的应变能密度、Mises应力和-LE13的极值较小,力学性能优化结果相对明显。

3 带束层优化的数值计算

3.1 设计方案优化

带束层作为全钢子午线轮胎的主要骨架材料,对轮胎刚度和接地性能影响巨大^[8]。首先建立3种不同带束层结构有限元模型。其中B1方案为原始方案,B2方案为对比方案,B3方案为B2方案带束层宽度调整方案,见图3。B1方案1[#]—4[#]带束层的宽度分别为290,250,330和270 mm;B2方案1[#]—4[#]带束层的宽度分别为165,110,145和130

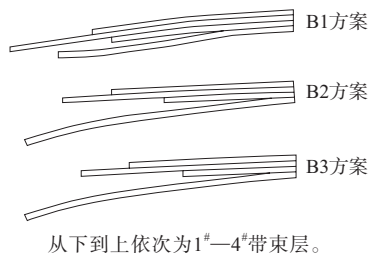


图3 不同带束层结构方案

mm;B3方案在B2方案的基础上,2[#],3[#]和4[#]带束层单边宽度减小7 mm,即1[#]—4[#]带束层的宽度分别为165,103,138和123 mm。带束层角度为“左右左右”,1[#]和2[#]带束层为工作层,3[#]和4[#]带束层为缓冲层。

建模过程中为消除网格带来的计算差异,不同带束层宽度计算方案采用同一橡胶材料网格划分,通过材料属性的重新分配实现不同材料分布的有限元模型。同时,兼顾胎肩材料分布的影响,带束层优化方案基于S2方案轮胎材料分布进行。

3.2 胎肩性能对比

带束层设计方案优化前后轮胎胎肩部位力学性能如表4所示。

表4 B1—B3方案轮胎胎肩部位力学性能

项 目	B1方案	B2方案	B3方案
应变能密度/($\text{mJ} \cdot \text{mm}^{-3}$)	0.383	0.285	0.247
Mises应力/MPa	2.736	1.956	1.909
周向剪切应变极值/%			
+LE13	0.422	0.323	0.408
-LE13	-0.456	-0.473	-0.433

注:应变能密度、Mises应力和周向剪切应变的极值出现在2[#]带束层端点及2[#]带束层与1[#]带束层夹胶位置。

对比3种带束层设计方案可知,B3方案轮胎的应变能密度、Mises应力和-LE13的极值较小。综合考虑胎肩部位力学性能优化结果,采用B3带束层设计方案进行后续样品轮胎试制。

3.3 其他力学性能指标评判

轮胎的仿真结果评价是一项综合的分析,本研究除了对胎肩部位的力学性能进行分析之外,还对轮廓充气变形、接地数据等进行对比分析,S1,S2和B3方案轮胎的接地印痕对比见图4。

从图4可以看出,B3方案轮胎的肩系数增大,这有利于胎肩部位花纹块偏磨的改善,但其接地压力分布极值偏大。

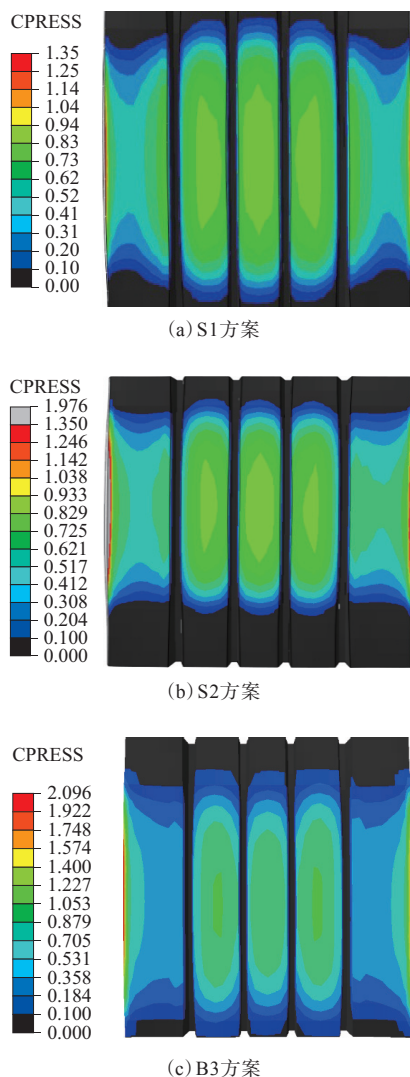


图4 不同方案轮胎接地压力云图

取轮胎接地最宽位置做路径取值得到接地压力分布曲线,如图5所示。

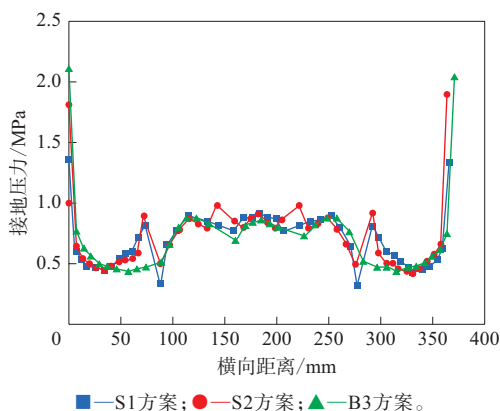


图5 横向接地压力分布

从图5可以看出,不同方案轮胎的数值分析的极值多出现在胎肩的边缘处,这可能是胎肩部位网格畸变引发的数值突变造成的。另外,接地中心位置的接触压力较为平稳,3种方案轮胎在接地中心处接地压力相当,但在胎肩花纹内侧边部(横向距离70和280 mm处)B3方案轮胎接地压力无突变,有明显改善。

上述有限元分析结果表明,在接地压力数值相当的情况下,B3方案轮胎肩系数增大至100%,即在接地总面积整体不变的情况下,接地形状更加均匀,接地印痕矩形率增大,胎肩部位性能提高,可以降低实际使用中轮胎肩部前高后低的畸形磨损。

4 轮胎室内和实地性能测试

4.1 室内耐久性能

B3方案样品轮胎采用恒定速度、变负荷的方式进行耐久性试验^[9],试验速度恒定为 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,47 h之后每行驶10 h,负荷增大10%。耐久性试验结果表明,试验结束时B3方案轮胎胎肩鼓包,累计行驶时间为130 h,原方案轮胎为108 h,耐久性能比原方案轮胎提高17%。

4.2 实地测试

445/80R25 ETCRANE轮胎经试制评审通过后,小批量定制产品发往终端测试客户进行实地测试验证。

根据场景匹配,选取M国DEMAG 70T和T地区TADANO 130T全路面起重机若干辆整车替换轮胎进行测试。根据产品场景和历史特性,定义行驶10 000 km无早期故障为测试目标。经历装车、5 000 km、10 000 km和10 000 km以上里程等多个测试节点,铺装和非铺装路面平均磨耗为 $4 000 \text{ km} \cdot \text{mm}^{-1}$,肩部偏磨问题有所改善,50条测试轮胎早期里程为10 000 km时无质量问题发生,初步达成实地测试目标。后续将逐步扩大样本,持续跟踪验证,产品逐步上市。

5 结论

(1) 建立纵向花纹445/80R25 ETCRANE工程机械轮胎有限元模型,确认合适的初始和边界条

件,有限元数值仿真计算结果与实测结果相对误差小于3%,验证了初始有限元模型的准确性。

(2)通过调整胎肩垫胶、内衬层和胎体曲线的材料分布,对比分析两种材料分布方案轮胎胎肩力学性能,结果表明胎里过渡调整S2方案轮胎的肩部力学性能更优。

(3)在胎肩优化的S2方案基础之上,对比3种带束层设计方案轮胎的肩部力学性能,有限元分析结果表明,B3带束层方案(1[#]—4[#]带束层宽度分别为165,103,138和123 mm)轮胎胎肩部位受力状态最优,同时接地性能达标,接地印痕矩形率增大,肩部预期偏磨改善。

(4)采取B3方案进行样胎试制和成品轮胎室内试验,轮胎耐久性试验中累计行驶时间为130 h,耐久性能比原方案轮胎提高17%,通过试制评审。

(5)产品小批量生产并发往测试客户进行整车替换,50条轮胎早期里程10 000 km无质量问题,初步达成实地测试目标。

参考文献:

- [1] 吴其晔. 高分子物理[M]. 北京:高等教育出版社,2011.
- [2] 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.
- [3] 熊春明,臧孟炎,晏宁. 全钢子午线轮胎温度场仿真研究[J]. 机械设计与制造工程,2017,46(2):35-39.
- [4] 周梦雨,李凡珠,杨海波,等. 基于非线性黏弹性本构模型的轮胎滚动和生热[J]. 高分子材料科学与工程,2020,36(3):73-78.
- [5] 张昊,胡尧生,尹海山,等. 全钢子午线轮胎应力和生热研究[J]. 轮胎工业,2006,26(9):515-521.
- [6] 王新宇,王伟. 橡胶动态生热数值模拟与实验研究[J]. 高分子学报,2021,52(7):787-795.
- [7] 孙熙林. 轮胎花纹排水性的有限元仿真及结构优化[D]. 青岛:青岛科技大学,2019.
- [8] 张伟伟,孙世悦,傅相诚,等. 基于带束层帘线模型的轮胎静态接地印痕仿真精度提升研究[J]. 轮胎工业,2022,42(4):268-271.
- [9] 胡海明,武凯迪. 成型辅鼓直径对轮胎耐久性能的影响[J]. 橡胶工业,2020,67(8):625-628.
- [10] 孙奇涛,王庆,张腾飞,等. 半钢子午线轮胎耐久性试验问题分析及解决措施[J]. 橡胶科技,2021,19(4):190-192.

收稿日期:2023-06-24

Finite Element Optimization Design and Product Performance Improvement of 445/80R25 ETCRANE Off-The-Road Tire for Cranes

YIN Haijian, MENG Qingwei, PAN Guohui, SUN Xilin, LIU Benxin

[Techking (Qingdao) Special Tire Technology Research and Development Co., Ltd., Qingdao 266100, China]

Abstract: Aiming at the problem of delamination and heat build-up of crane tire shoulder in high-speed scene, the finite element analysis model of 445/80R25 off-the-road tire with longitudinal tread pattern was established by using the finite element method, and the numerical analysis optimization and product performance improvement were carried out. The accuracy of the finite element model was verified by comparing the simulation results of the tire stiffness and grounding data of the original scheme with test results. The material distribution at the tire shoulder was optimized, and on this basis, different belt structure schemes were used to carry out finite element analysis on the stress at the tire shoulder, and the stress state at the end of the belt was optimized. The results showed that the B3 belt scheme (1[#]—4[#] belt width was 165, 103, 138 and 123 mm respectively) with optimized shoulder and tire lining curves had the best stress state at the tire shoulder, achieving the improved design goal. The test verified that the durability of the B3 scheme tire was 17% higher than that of the original scheme tire, the rectangle ratio of footprint was increased, and the wear resistance was improved. The test of overseas target customers showed that there was no shoulder delamination problem in early driving for 10 000 km, which met the improvement target.

Key words: crane tire; off-the-road tire; shoulder delamination; heat build-up; finite element analysis