24.00R35全钢工程机械子午线轮胎胎圈裂口机理 研究及胎圈部位轮廓设计优化

李 森,谢仕强,印海建,殷洪鑫,蒙毅钊

[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:基于有限元分析软件对24.00R35全钢工程机械子午线轮胎胎圈裂口进行仿真分析,分析胎圈裂口机理,结合 分析结果对胎圈部位轮廓设计进行优化,并试制成品轮胎进行验证。结果表明:胎圈部位过渡圆弧设计和防水线高度对 胎圈部位受力影响较大;胎圈侧部采用垂直线设计、胎圈部位轮廓与轮辋曲线互不干涉时,胎圈部位与轮缘的接触压力 和剪切应力相对较小;适当的防水线高度可以减小轮胎防水线位置的接触压力和剪切应力;采取优化设计可以明显降低 胎圈部位裂口风险,避免轮胎的早期失效,延长轮胎的使用寿命。

关键词:全钢工程机械子午线轮胎;胎圈;裂口;防水线;轮廓优化;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)06-0331-07 DOI:10.12135/j.issn.1006-8171.2023.06.0331



随着全球矿业市场的复苏和快速发展,各大 矿山用户对全钢工程机械轮胎的需求不断上涨, 包括露天矿用刚性自卸车轮胎¹¹。露天矿用轮胎 主要应用于环境恶劣的金属矿、采石场和煤矿等, 不同应用场景对轮胎性能的需求也不尽相同,如 处于热带的露天煤矿通常路面松软、坑洼多、雨季 十分泥泞,对轮胎的胎圈部位性能考验较大,轮胎 失效部位往往集中在胎圈(见图1),轮胎早期失效 风险偏大,极大地降低了车辆的使用效率。本研 究针对市场反馈的24.00R35全钢工程机械子午线 轮胎胎圈裂口问题,基于有限元分析软件对胎圈 裂口机理进行仿真分析,并结合分析结果对胎圈 部位轮廓设计进行优化。

1 胎圈裂口机理及研究方法

1.1 胎圈裂口机理

矿用刚性自卸车轮胎配备的轮辋为多件式全 斜底轮辋,主要由轮缘、圈座和锁圈等部分构成, 其中在轮胎使用过程中与轮胎胎圈部位接触的位 置主要是轮缘。根据市场反馈,24.00R35全钢工 程机械子午线轮胎胎圈裂口形式主要有2种,一种 是由于轮缘与胎圈过盈配合处相互作用造成的胎 圈部位裂口(见图2),另一种是轮缘与防水线相互 作用造成的防水线裂口(见图3)。

1.2 研究方法

1.2.1 剪切应力分析

轮胎与轮辋的剪切应力主要分为周向剪切应 力和轴向剪切应力,正常负荷条件下,当轮胎胎圈 部位与轮辋产生周向或轴向的相对位移时,接触 表面会产生相应的剪切应力,对胎圈部位裂口有 较大影响。考虑到轮胎实际工作状态主要为周向 转动,因此本研究主要对周向剪切应力进行分析, 致力于降低胎圈侧部和防水线位置的周向剪切应 力,以降低胎圈部位裂口风险。

1.2.2 接触压力分析

轮胎与轮辋的接触压力主要产生于胎圈侧部 和底部与轮辋的相互接触,当胎圈部位设计确定 时,正常负荷条件下轮辋对胎圈整体的作用力是 一定的,若胎圈侧部受力增大,胎圈底部受力会相 应减小,反之亦然。因此,在考虑减小胎圈侧部受 力的同时还要对胎圈底部受力进行平衡,避免胎 圈底部受力过大,产生裂口风险。根据市场反馈, 24.00R35全钢工程机械子午线轮胎胎圈裂口主要

作者简介:李森(1982—),男,安徽太和县人,泰凯英(青岛) 专用轮胎技术研究开发有限公司工程师,学士,主要从事全钢工程 机械轮胎和载重轮胎的结构设计及研发管理工作。

E-mail: terry. li@techking. com



(a)





(c) 图1 胎圈部位裂口现象



图2 胎圈与轮缘过盈配合处裂口机理示意

集中于胎圈侧部和防水线位置,本次研究主要致 力于减小胎圈侧部和防水线与轮辋的接触压力, 降低胎圈裂口风险。

1.2.3 胎圈耐久性试验

胎圈耐久性试验的主要目的是验证轮胎设计



图3 防水线与轮缘接触处裂口机理示意

优化后胎圈耐久性能不下降。同时,为验证胎圈 设计优化方案的正确性,本次研究对耐久性试验 后轮胎胎圈部位的表现进行分析对比,主要关注 设计优化前后胎圈侧部和防水线位置的裂口表 现,以确定优化设计方案是否有效。

2 有限元模型的建立

有限元分析是指利用数学近似的方法对真实物理系统进行模拟,同时利用简单而又相互作用的元素(单元)实现用有限数量的未知量去逼近无限未知量的真实系统。利用有限元分析的方法,设计人员可以更高效地获得理论设计的数据支撑,对于产品性能改善十分重要。轮胎的仿真计算过程有材料、几何、接触三大非线性,理论求解十分困难,因此在轮胎结构设计中使用有限元分析求解越来越重要,在轮胎的研发过程中使用有限元工具将大大提高研发效率,有效降低研发成本^[2]。轮胎的有限元分析主要分为材料模型的建立和有限元模型的建立两大部分。

2.1 材料模型及骨架结构设计

矿用工程机械子午线轮胎主要由橡胶材料和 金属骨架材料组成。在轮胎有限元分析中通常使 用Yeoh本构模型表征橡胶材料的高弹性。本研究 对轮胎各部位胶料做单轴拉伸应力-应变曲线,通 过最小二乘法拟合得到Yeoh本构模型的材料参 数。金属骨架材料是线弹性材料,使用弹性模量 和泊松比表征其应力-应变行为。胎圈表面与轮 辋表面的接触摩擦因数定为0.3。带束层的结构 参数见表1。

2.2 有限元模型

根据分析需求,本研究主要考虑对胎圈裂口 问题存在潜在影响的多个因素同时进行验证,以

		表1	带束层的结构参数			
项目	1#带束层	2 [#] 带束层	3 [#] 带束层	4 [#] 带束层	5 [#] 带束层	6 [#] 带束层
帘线角度/(°)	26	26	26	18	26	26
铺设方向	右	左	右	左	左	右
钢丝帘线规格	$7 \times 7 \times 0.22 +$	$4 \times 6 \times 0.25 \text{HE}$	$4 \times 6 \times 0.25 \text{HE}$			
	0.15HT	0.15HT	0.15HT	0.15HT		
宽度/mm	350	440	384	260	520	410
带束层伸张值	1.035	1.035	1.035	1.035	1.035	1.035

便从分析结果中得出对胎圈裂口问题影响相对较 大的因素,然后有针对性地做出相应的产品优化 方案^[3]。胎圈主要设计参数如图4所示。



α一胎圈侧部与轮缘夹角;过渡圆弧直径不大于轮辋直径时 为过盈设计。

图4 胎圈主要设计参数示意

不同胎圈部位轮廓优化设计方案如图5和表2 所示。

基于胎圈部位轮廓优化设计方案,在有限元 模型建立之前,首先对24.00R35全钢工程机械子 午线轮胎的材料分布图进行简化处理,合并断点、 删除重复线段、取消小特征等,保留直线及弧线, 然后利用网格划分软件进行网格划分^[4-5],建立二 维和三维有限元模型,如图6所示。在标准充气压 力和标准负荷条件下,利用有限元分析软件进行 轮胎二维充气和三维静态加载接地模拟,对胎圈 部位受力进行分析对比。



7—方案6。

图5 胎圈部位轮廓优化设计方案示意

3 结果与讨论

3.1 有限元仿真结果分析

3.1.1 充气外缘尺寸和静负荷

表3所示为不同设计方案轮胎充气外缘尺寸

秋2 千円加回的世纪净优化改计为未				
验证目标	对比方案	评价维度		
α=2°对胎圈裂口的影响	方案6(α=2°)/方案0(α=0°)	胎圈侧部:接触压力、胎圈侧部周向剪切应力		
R4过渡圆弧过盈配合设计对胎圈裂口的影响	方案0(过盈)/方案2(非过盈)	R₄过渡圆弧位置:接触压力和周向剪切应力		
	方案4(过盈)/方案5(非过盈)			
防水线高度对胎圈裂口的影响	方案1/方案6/方案2	防水线上、下沿应力		
有无防水线对胎圈裂口的影响	方案2/方案3	防水线附近压力		

表2 不同胎圈部位轮廓优化设计方案







图6 轮胎有限元模型

表3 不同设计方案轮胎充气外缘尺寸和静负荷仿真

结果及与实测结果对比 mm						
士安		仿真结果		实测	结果	
万乘- 编号	充气外 直径	充气静 半径	充气断 面宽	充气外 直径	充气断 面宽	
0	2 183.2	1 091.6	658.0	2 181.0	668.0	
1	2 183.4	1 091.7	661.7			
2	2 183.4	1 091.7	661.8			
3	2 183.4	1 091.7	661.8			
4	2 182.8	1 091.4	655.2	2 176.0	661.0	
5	2 183.6	1 091.8	658.7			
6	2 185.6	1 092.8	642.0	2 179.0	666.0	

注:轮辋 17/3.5,充气压力 700 kPa,负荷 18 500 kg。 和静负荷仿真结果及与实测结果对比。

从表3可以看出,各优化设计方案轮胎的充气 外直径和充气断面宽仿真结果与实测结果相差不 大,均在5%允许误差范围内,表明仿真数据具有很 高的可靠性。

3.1.2 a的影响

图7所示为方案6(a=2°)与方案0(a=0°)轮胎





接触压力对比。

从图7可以看出,方案6和方案0轮胎在胎圈侧 部区域接触压力均为零,可以认为a对胎圈裂口无 明显影响或影响较小。

3.1.3 R4过渡圆弧过盈配合的影响

轮胎接触压力和周向剪切应力数据提取路径 如图8所示,不同R₄过渡圆弧过盈配合设计方案轮 胎接触压力和周向剪切应力最大值和幅值对比如 表4所示。

从表4可以看出:非过盈设计方案轮胎的胎圈



图8 轮胎接触压力和周向剪切应力数据提取路径

表4	不同 <i>R₄</i> 过渡圆弧过盈配合设计方案轮胎接触	!压力和
	国向前切应力是士值和幅值对比	MD

	切应力取力	て1111111111111111111111111111111111111	且刈忆	мРа
项目	方案0	方案2	方案4	方案5
胎圈底部				
最大接触压力	6.398	8.851	6.942	7.359
接触压力变化	1.754	1.817	1.800	1.668
最大剪切应力	1.523	2.350	1.681	1.844
剪切应力变化	0.312	0.507	0.271	0.458
胎圈侧部				
最大接触压力	5.233	4.120	4.963	4.178
接触压力变化	0.854	0.497	1.577	0.909
最大剪切应力	1.469	1.018	1.449	1.072
剪切应力变化	0.845	0.545	0.959	0.474

侧部位置接触压力和剪切应力均小于过盈设计方 案轮胎;胎圈底部则相反,非过盈设计轮胎的胎圈 底部整体应力较大,但综合市场反馈,非过盈设计 轮胎无胎圈底部裂口问题,因此重点关注胎圈侧 部受力情况即可^[6]。

3.1.4 防水线高度的影响

方案1,6,2(防水线高度分别为9.2,13.0和 16.9 mm)轮胎的最大接触压力和周向剪切应力对 比如表5所示。

表5 不同防水线高度设计方案轮胎防水线上下边缘接触

压力和周	MPa					
项 目	方案1	方案6	方案2			
防水线上边缘	防水线上边缘					
最大接触压力	1.60	0.43	0.11			
最大周向剪切应力	0.070	0.016	0.008			
防水线下边缘						
最大接触压力	3.30	1.82	0.37			
最大周向剪切应力	0.140	0.048	0.010			

从表5可以看出:防水线高度对胎圈裂口影响 较大,随着防水线与轮辋距离的增大,防水线上下 边缘的最大接触压力和最大周向剪切应力都明显 减小;且最大周向剪切应力都远小于最大接触压 力,说明接触压力(挤压)对防水线位置裂口的影 响超过周向剪切应力¹⁷。

3.1.5 防水线的影响

有无防水线设计方案轮胎防水线上下边缘最 大接触压力和周向剪切应力对比如表6所示。

从表6可以看出:在方案2轮胎应力已明显下降的基础上,方案3轮胎取消防水线后,应力进一步减小,胎圈裂口风险进一步降低^[8];有无防水线

表6 有无防水线设计方案轮胎防水线上下边缘接触压力

和周回	ti MPa	
项 目	方案2	方案3
防水线上边缘		
最大接触压力	0.110	0
最大周向剪切应力	0.008	0
防水线下边缘		
最大接触压力	0.370	0.260
最大周向剪切应力	0.010	0.006

设计对胎圈裂口有一定影响,但影响程度较小,影 响程度小于防水线高度。

3.2 胎圈耐久性试验

3.2.1 试验条件

胎圈耐久性试验条件如表7所示。

表7 胎圈耐久性试验条件

阶段	速度/ (km • h ⁻¹)	负荷率/ %	行驶时间/ h	累计行驶 时间/h	
1	5	40	24	24	
2	5	50	24	48	
3	8	80	24	72	
4	8	80	24	96	
5	8	100	12	108	
6	8	100	12	120	
7	8	120	12	132	
8	8	120	12	144	
9	8	150	12	156	
10	8	160	72	228	
11	8	170	72	300	
12	8	180	至损坏	>300	

注:转鼓直径为5 m。

3.2.2 试验轮胎

采用方案0和方案1试制成品轮胎进行胎圈耐 久性试验。

3.2.3 试验结果

胎圈耐久性试验结果表明:方案0轮胎累计行 驶时间为289 h,试验结束时轮胎损坏形式为胎圈 脱层;方案1轮胎累计行驶时间为200 h,试验结束 时轮胎损坏形式为胎圈脱层。

胎圈耐久性试验结束后方案0和方案1轮胎胎 圈部位对比见图9。

根据方案0和方案1轮胎胎圈耐久性试验可 知:方案0轮胎防水线下裂口严重,近距离观察胎 体帘线漏出,轮胎损坏;方案1轮胎仅在防水线位 置出现斜向裂口,深度较浅,不足以导致轮胎损



(a)方案0



(b)方案1

图9 胎圈耐久性试验后方案0轮胎与方案1轮胎 胎圈部位对比

坏^[9]。相对于方案0轮胎,方案1轮胎由过盈设计改 为非过盈设计,防水线高度未做调整,体现了方案 1改善方向正确,验证了非过盈设计对胎圈裂口问 题改善的有效性,但因防水线位置仍存在斜向裂 口,也证明了防水线高度对于胎圈裂口问题存在 影响,适当的防水线高度设计可以减缓胎圈裂口 问题出现^[10]。

3.2.4 实际市场反馈结果

根据市场反馈情况来看:方案0轮胎市场反馈 胎圈裂口问题严重,主要集中于防水线以下位置 开裂漏钢丝,导致轮胎中前期失效,如图10所示; 方案1轮胎自测试以来,轮胎使用前期基本无胎圈 裂口问题,如图11所示,但使用中期仍出现防水线 裂口^[11],如图12所示。与方案0轮胎相比,方案1 轮胎同期裂口情况更轻,深度较浅,不影响轮胎使 用,实际市场反馈结果与室内试验结果一致,均证 明了方案1的优化方向正确,但也证明了防水线高 度仍存在改进空间^[12-17]。

综合有限元分析、室内胎圈耐久性试验和市场反馈结果来看,24.00R35全钢工程机械子午线轮胎胎圈部位R4过渡圆弧过盈配合设计和防水线



图10 方案0轮胎使用中期失效



图11 方案1轮胎使用前期情况



图12 方案1轮胎使用中期失效

高度设计对胎圈部位受力存在较大影响,胎圈侧 部倾角、有无防水线设计则影响较小^[13]。因此,胎 圈侧部位采用垂直线设计、胎圈部位轮廓与轮辋 曲线不干涉时,胎圈部位与轮缘的接触压力和剪 切应力相对更小^[18];同时适当的防水线高度、形状 设计亦可以减小轮胎防水线位置的接触压力及剪 切应力^[19]。

4 结论

基于有限元分析软件对24.00R35全钢工程机 械子午线轮胎胎圈裂口进行仿真分析,分析胎圈 裂口机理,结合分析结果对胎圈部位轮廓设计进 行优化,并试制成品轮胎进行验证。结果表明:胎 圈部位过渡圆弧设计和防水线高度对胎圈部位受 力影响较大;胎圈侧部采用垂直线设计、胎圈部位 轮廓与轮辋曲线互不干涉时,胎圈部位与轮缘的 接触压力和剪切应力相对较小;适当的防水线高 度可以减小轮胎防水线位置的接触压力和剪切应 力;采取优化设计可以明显降低胎圈部位裂口风 险,避免轮胎的早期失效,延长轮胎的使用寿命, 为客户降低运行成本。

参考文献:

- [1] 毛建清. 24. 00R35全钢工程机械子午线轮胎的设计[J]. 橡胶工业, 2017,64(8):481-484.
- [2] 李炜.子午线轮胎结构有限元分析和设计原理的若干问题研 究[D].合肥:中国科学技术大学,2003.
- [3] 蔡庆,韩成勇,徐立.全钢巨型工程机械子午线轮胎胎圈结构设 计[J].轮胎工业,2015,35(6):328-331.
- [4] 宿晓峰, 付平, 丁忠军, 等. 基于Abaqus软件的轮胎有限元模型建 立及仿真分析[J]. 橡胶工业, 2019, 66 (2):121-124.
- [5] 胡小玲,刘秀,李明,等.炭黑填充橡胶超弹性本构模型的选取策 略[J].工程力学,2014,31(5):34-42.
- [6] 俞淇,丁剑平.子午线轮胎结构设计与制造技术[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [7] 潘涛.子午线轮胎轮廓设计理论的相关研究[D].广州:华南理工大学,2011.

- [8] 中岛幸雄. 轮胎轮廓设计技术[J]. 仲莹,译. 轮胎工业,1998,18(6): 337-342.
- [9] 隆有明. 轮胎整体结构优化设计理论TECO及其推广应用[J]. 上海 化工,1999,24(8):17-21.
- [10] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解[M]. 北京:机械 工业出版社,2006:137-138.
- [11] 李丽娟,刘峰,苏秀平,等.轮胎结构力学设计理论研究进展[J].轮 胎工业,2000,20(7):579-582.
- [12] 杜春娟. 基于ABAQUS的子午线轮胎的非线性有限元分析[D]. 重 庆:重庆交通大学, 2012.
- [13] 曹桂华. 全钢丝载重子午线轮胎的有限元分析[D]. 上海:东华大学,2007.
- [14] 道格・皮尔斯,戴尔・E・席默勒格,雷格・C・鲍曼,等.胎 圈[P].中国:CN 105263730A,2016-01-20.
- [15] 任晓静,马向前,何昌伟,等.矩形钢丝圈对胎圈性能的影响[J].
 轮胎工业,2022,42(8):456-459.
- [16] 程钢,赵国群,管延锦.滚动轮胎耐久性有限元分析[J].弹性体, 2006(1):20-25.
- [17] 刘悦. 全钢丝子午线轮胎耐久性优化方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔 滨工业大学,2017.
- [18] 丁剑平,贾德民,黄小清.三维非线性有限元法在子午胎分析中的应用[J].华南理工大学学报(自然科学版),2005,33(6):55-58.
- [19] 陈刚,杨文利,潘岱,等. 29. 5R25全钢工程机械子午线轮胎的研 究与开发[J].轮胎工业,2010,30(5):268-273.

收稿日期:2023-01-24

Research on Bead Crack Mechanism of 24. 00R35 All-steel Off-The-Road Radial Tire and Optimization of Bead Contour Design

LI Miao , XIE Shiqiang , YIN Haijian , YIN Hongxin , MENG Yizhao

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

Abstract: The bead crack of 24. 00R35 all-steel off-the-road radial tire was simulated by using finite element analysis method and the mechanism was analyzed. The bead contour design was then optimized based on the analysis results, and the trial-produced tires were tested for verification. The results showed that, the design of transition arc and the height of waterproof line had great influence on the stress of the bead. The contact pressure and shear stress between the rim and the bead part were relatively small when the bead side was designed with a vertical line and the contour of the bead part and rim curve did not interfere with each other. Furthermore, appropriate height of waterproof line could reduce the contact pressure and shear stress at the position of waterproof line. The optimized design could significantly reduce the risk of bead cracking, avoid early tire failure, and thus extend the service life of tires.

Key words: all-steel off-the-road radial tire; bead; crack; waterproof line; contour optimization; finite element analysis