

基于有限元分析轮胎胎圈设计对圈部耐久性 能的影响

Effect of Tire Bead Design on Bead Durability via Finite Element Analysis

战琪轩, 杨万龙, 张汉青, 邱新新, 姜洪旭, 车辉, 于慧

Zhan Qixuan, Yang Wanlong, Zhang Hanqing, Qiu Xinxin, Jiang Hongxu, Che Hui, Yu Hui

(雄鹰轮胎集团有限公司 山东 青岛 266000)

摘要: 本文基于 Abaqus 有限元分析软件, 针对设计师提供的五种轮胎胎圈设计方案, 开展超压超载工况下的仿真分析。通过对比各方案的应变能密度、剪切应变及局部坐标系下端点应变等指标, 探究轮胎胎圈设计对圈部耐久性能的影响, 并进行方案优选。研究结果为轮胎胎圈结构设计提供了理论依据。

关键词: 有限元; 胎圈; 应变能密度; 应变; 耐久性能

1 引言

轮胎作为汽车与地面的唯一接触部件, 其性能好坏直接影响车辆行驶的安全性、舒适性。而轮胎胎圈部位是轮胎承担车辆重量、传递驱动力和制动力的重要组成部分。胎体反包高度、子口包布高度以及尼龙包布的位置等是影响轮胎胎圈性能的关键结构参数, 不合理的设计方案会造成轮胎脱层、圈裂等问题, 进而影响轮胎的使用寿命和车辆的行驶安全^[1]。

传统的轮胎设计主要依靠设计师的经验和实胎试验, 成本高且周期长。而利用仿真软件对轮胎性能进行分析, 能够在设计阶段预测轮胎在实际工况条件下的性能, 能够有效降低研发的成本与周期。本研究借助 Abaqus 软件, 对五种轮胎胎圈设计方案进行建模与仿真, 在超压超载工况下, 综合对比分析各方案圈部耐久性能, 为轮胎优化设计提供有力的理论支持。

2 轮胎有限元模型的建立

2.1 几何图形清理

本次研究的方案图纸由设计师提供, 轮胎设计图纸内容复杂, 包含众多与仿真分析无关的几何特征, 在仿真前处理阶段, 为提升仿真收敛性与计算效率, 需要对图纸中的各部件进行合理简化。利用 CAD 绘图软件清理设计图纸中的标注、防擦线和分模线等几何特征, 仅保留各方案材料分布图部分, 五种方案的圈部设计差异如图 1 所示。

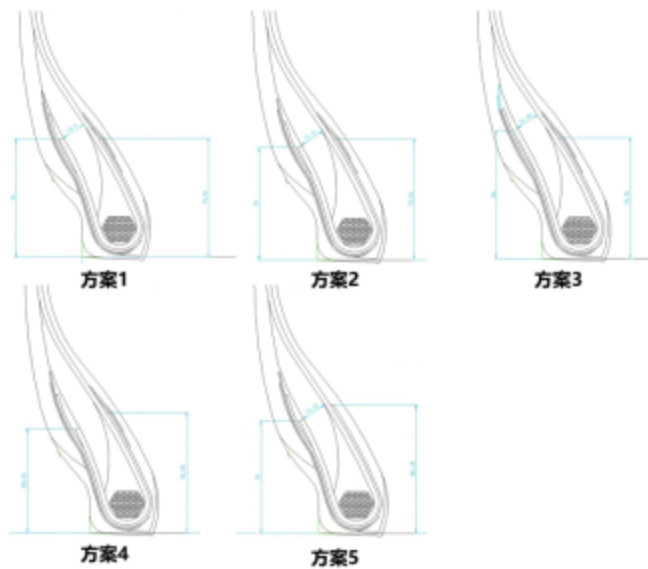


图 1 胎圈设计方案对比图

2.2 网格划分

网格的密度大小与质量好坏直接影响仿真结果的精度和计算的效率。由于本次仿真分析的重点为轮胎圈部，尤其是胎体反包端点以及子口包布端点等部位，为提高计算精度，需对该区域进行网格细化处理；而对于其他部分，可以适当加粗网格，提升计算效率。使用网格划分软件 Hypermesh，以相同的网格划分标准，对五种方案的材料分布图进行网格划分。其中胎体和子口包布采用双层网格划分，帘线网格采用共节点的创建方式，以方案 1 为例，最终网格划分情况如图 2 所示。

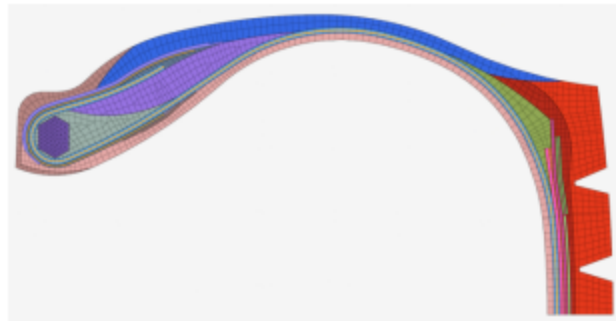


图 2 网格划分示意图

2.3 材料属性、边界条件和载荷工况的设定

在材料属性设定方面，橡胶材料选用超弹性模型 Yeoh 模型，通过实验测试与材料参数拟合，获取材料参数 C_{10} 、 C_{20} 、 C_{30} ；帘线及钢丝圈材料则采用弹性模型，设定其弹性模量、泊松比等参数^[4]。

为确保仿真结果与轮胎实际工作状态相符，本次仿真条件为超压超载工况，通过修改 inp 模板文件中的参数直接进行调整。轮胎与轮辋之间的接触采用罚函数设置摩擦系数，轮胎与地面的接触同理。对轮胎内表面施加充气压力，模拟内部气压对轮胎的作用。对地面施加垂直向上的载荷，模拟轮胎负载时的受力情况^[4]。

3 仿真结果

轮胎圈部耐久性能的好坏主要体现在胎体反包端点和子口包布外端点处，轮胎圈部破坏时，通常先在帘线钢丝的端点与胶料粘合部位开始产生裂纹，在车辆行驶过程中，随着轮胎的应力应变状态不断变化，裂纹会沿着胎体和子口包布帘线之间的胶料逐渐延伸，最终导致

圈裂等失效现象。本文以应变能密度、剪切应变和局部坐标系下的端点应变这三个指标对轮胎圈部的耐久性能进行仿真分析^[4-7]。

3.1 应变能密度分析(Sener)

在 Abaqus 中,应变能密度是指单位体积内的应变能,而应变能是应力与应变的综合,因此可以通过对比应变能密度数据来对比轮胎胎圈耐久性能。

通过仿真计算,得到各方案胎体反包端点及子口包布外端点的应变能密度数据及曲线图如表 1 和图 3 所示。

表 1 应变能密度数据对比

方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
胎体反包端点 Sener_峰值	0.6404	1.0874	0.5488	1.5436	0.9845
胎体反包端点 Sener_幅值	0.4147	0.4995	0.4558	0.6367	0.4758
胎体反包端点 Sener_R 值	0.5231	0.5407	0.2776	0.6333	0.5481
子口包布外端点 Sener_峰值	0.0936	0.0936	0.1163	0.1035	0.0947
子口包布外端点 Sener_幅值	0.0872	0.0805	0.1113	0.0942	0.0821
子口包布外端点 Sener_R 值	0.1011	0.1405	0.0994	0.0956	0.1346

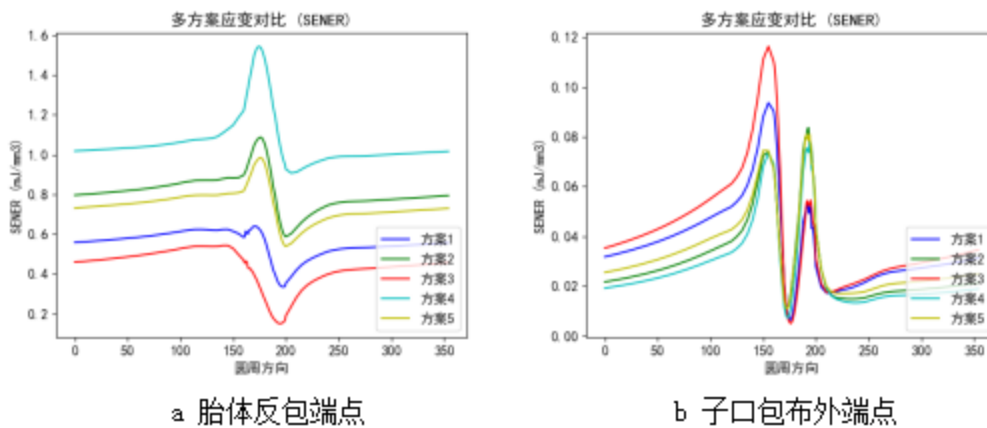


图 3 应变能密度周向曲线图

3.2 剪切应变分析(LE12)

轮胎圈部破坏时,裂纹通常会沿着胎体和子口包布帘线之间的胶料扩展,而剪切应变反映了胎体与子口包布之间的剪切情况,通过对比各方案的剪切应变数据,可以初步评估裂纹扩展的速度。

根据仿真结果得到各方案胎体反包端点及子口包布外端点的剪切应变数据及曲线图如表 2 和图 4 所示。

表 2 剪切应变数据对比

方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
胎体反包端点	0.7328	0.915	0.664	1.066	0.8549

LE12_峰值					
胎体反包端点 LE12_幅值	0.233	0.235	0.346	0.2208	0.224
胎体反包端点 LE12_R 值	0.6827	0.743	0.4797	0.7928	0.7384
子口包布外端点 LE12_峰值	0.0827	0.0833	0.086	0.0498	0.0816
子口包布外端点 LE12_幅值	0.1302	0.1135	0.1156	0.1097	0.1172
子口包布外端点 LE12_R 值	-0.5734	-0.3632	-0.447	-1.2054	-0.4668

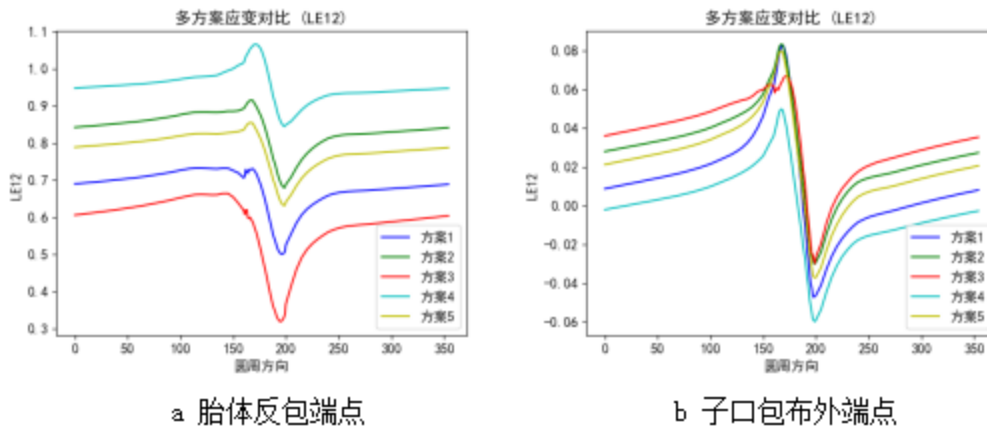


图 4 剪切应变周向曲线图

3.3 局部坐标系下的端点应变 (LE11)

由于帘线与胶料的模量差距较大，在轮胎发生形变时，帘线的应变较小而胶料的应变较大。特别是胎体帘线端点处，在轮胎行驶过程中，胎体帘线往往会上下抽动，导致端点与胶料粘合部位产生裂缝。针对这种现象，本研究通过在帘线端点处建立局部直角坐标系，直接对端点单元的应变数据进行分析。

根据仿真结果得到各方案胎体反包端点及子口包布外端点的局部坐标系下的端点应变数据及曲线图如表 3 和图 5 所示。

表 3 局部坐标系下的端点应变数据对比

方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
胎体反包端点 局部 LE11_峰值	0.3587	0.4168	0.3683	0.3943	0.4388
胎体反包端点 局部 LE11_幅值	0.4972	0.547	0.4906	0.5285	0.574
胎体反包端点 局部 LE11_R 值	-0.2891	-0.3122	-0.3319	-0.3405	-0.3083
子口包布外端点 局部 LE11_峰值	0.0814	0.0816	0.0993	0.0742	0.0795
子口包布外端点 局部 LE11_幅值	0.1385	0.1266	0.1477	0.1183	0.1325

子口包布外端点
局部 LE11_R 值 -0.7418 -0.9641 -0.6241 -1.0067 -0.8525

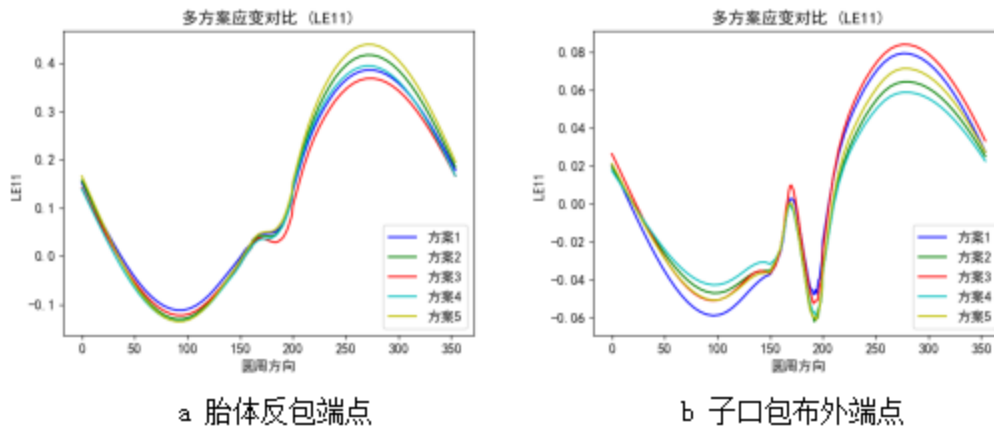


图 5 局部坐标系下的端点应变周向曲线图

4 数据对比分析

为了消除量纲的影响、避免特征权重失衡、进一步提高对比的准确性，本研究对胎体端点单元数据和子口包布外端点单元数据分别进行指标归一化处理，将最小值取为 0.5，最大值取为 1，归一化后的数据如表 4 所示。

表 4 归一化数据对比

分析部位	胎体反包端点					子口包布外端点				
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
LE12_峰值	0.586	0.812	0.500	1.000	0.737	0.954	0.963	1.000	0.500	0.939
LE12_幅值	0.549	0.557	1.000	0.500	0.513	1.000	0.593	0.644	0.500	0.683
LE12_R 值	0.824	0.920	0.500	1.000	0.913	0.875	1.000	0.950	0.500	0.938
Sener_峰值	0.546	0.771	0.500	1.000	0.719	0.500	0.500	1.000	0.718	0.524
Sener_幅值	0.500	0.691	0.593	1.000	0.638	0.609	0.500	1.000	0.722	0.526
Sener_R 值	0.845	0.870	0.500	1.000	0.880	0.561	1.000	0.542	0.500	0.934
局部 LE11_峰值	0.500	0.863	0.560	0.722	1.000	0.643	0.647	1.000	0.500	0.606
局部 LE11_幅值	0.540	0.838	0.500	0.727	1.000	0.844	0.641	1.000	0.500	0.741
局部 LE11_R 值	1.000	0.775	0.584	0.500	0.813	0.846	0.556	1.000	0.500	0.702
峰值指标	0.544	0.815	0.520	0.907	0.819	0.699	0.703	1.000	0.573	0.690
幅值指标	0.529	0.695	0.698	0.742	0.717	0.817	0.578	0.881	0.574	0.650
R 值指标	0.890	0.855	0.528	0.833	0.869	0.761	0.852	0.831	0.500	0.858
综合评价指标	0.537	0.755	0.609	0.825	0.768	0.758	0.641	0.941	0.573	0.670

其中：峰值指标=(LE12_峰值+Sener_峰值+局部 LE11_峰值) /3；幅值指标=(LE12_幅值+Sener_幅值+局部 LE11_幅值) /3；R 值指标=(LE12_R 值+Sener_R 值+局部 LE11_R 值) /3；综合评价指标=0.5*峰值指标+0.5*幅值指标。

根据圈部(胎体反包端点及子口外反包端点)耐久分析，结论如下：

a. 对比指标选择峰值、幅值、R 值。峰值越小，受力和变形越小；幅值越小，周期变化幅度越小；R 值越大，疲劳耐久越好；局部坐标系下 LE11，表征帘线端点的“抽出”效应，越小越好。

以峰值、幅值为主要评价指标，对指标进行归一化处理，指标越小，耐久越好，R 值作为

参考项。

b. 单一部位评价：

胎体反包端点优劣：方案 1>方案 3>方案 2>方案 5>方案 4

子口包布外端点优劣：方案 4>方案 2>方案 5>方案 1>方案 3

c. 由于归一化前胎体反包端点的各项数值均比子口包布外端点大，综合考虑后对结果进行权重分析，胎体端点权重 70%和子口包布外端点权重 30%，最终结果如表 5 所示。

表 5 综合评价数据结果

方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
胎体反包端点	0.537	0.755	0.609	0.825	0.768
胎圈包布反包端点	0.758	0.641	0.941	0.573	0.670
综合指标	0.603	0.721	0.708	0.750	0.739

综合评价：

方案 1>方案 3>方案 2>方案 5>方案 4

5 结论与不足

本文运用 Abaqus 有限元分析软件，对五种轮胎圈部设计方案的耐久性能进行了综合对比分析，研究表明，方案 1 为最优方案，为后续轮胎设计优化提供了重要的理论依据。

然而，本研究方案数量较少，存在局限性。后续需增加设计方案数量，以胎体反包高度、子口包布高度以及尼龙包布的位置等因素进行 DOE 分析，开展更全面的优化设计研究。

参考文献：

- [1]冯希金, 谭惠丰, 杜星文, 等. 子午线轮胎耐久破坏规律及破坏机理的有限元分析[J]. 轮胎工业, 2001, (10): 596-601+603.
- [2]黄建龙, 解广娟, 刘正伟. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡胶工业, 2008, (08): 467-471.
- [3]刘云鹏, 周涛, 杨晓光. 有限元分析在轮胎结构设计中的应用[J]. 轮胎工业, 2019, 39(05): 263-267.
- [4]徐文静, 张凤杰. 半钢子午线轮胎早期胎圈周向裂口原因分析及解决措施[J]. 橡胶科技, 2018, 16(04): 43-45.
- [5]张伟伟, 刘岩, 罗哲. 全钢子午线轮胎胎圈耐久性能试验方法有限元验证[J]. 橡胶科技, 2019, 17(10): 557-559.
- [6]杨娇娇, 张建浩, 张永锋. 基于有限元分析的轮胎胎圈耐久性能优化[J]. 橡胶科技, 2021, 19(03): 114-116.
- [7]朱凯新, 罗康玉, 王宝凯, 等. 轮胎胎圈部位结构参数的有限元优化设计[J]. 弹性体, 2025, 35(01): 7-12. DOI: 10.16665/j.cnki.issn1005-3174.2025.01.010.

第一作者简介：战琪轩（2000-），男，山东莱阳人，雄鹰轮胎集团有限公司工程师，学士，主要从事轮胎有限元仿真研究工作。

E-mail: zhanqixuan@tercelo.com