

全钢子午线轮胎胎圈耐久性能影响因素的有限元研究

姜洪旭¹, 孙宗涛², 刘昌波¹

[1. 浦林成山(青岛)工业研究设计有限公司, 山东 青岛 266011; 2. 浦林成山(山东)轮胎有限公司, 山东 荣成 264300]

摘要:通过有限元仿真研究设计参数对全钢子午线轮胎胎圈耐久性能的影响。研究的设计参数包括胎圈包布内端点高度、角度和密度, 三角胶模量、高度和下三角胶厚度, 胎体和胎圈包布反包高度, 胎圈内轮廓, 胎圈水平轴高度, 胎圈模具轮廓, 胎圈着合宽度, 钢丝圈排列和直径。通过建立不同设计参数与仿真判据(应变能密度)的响应关系, 得到设计参数对胎圈耐久性能的影响趋势。

关键词:全钢子午线轮胎; 胎圈; 设计参数; 有限元仿真; 耐久性能

中图分类号:U463.341; O241.82

文献标志码:A

文章编号:1006-8171(2019)09-0525-07

DOI:10.12135/j.issn.1006-8171.2019.09.0525

胎圈是轮胎结构中受力最大的部位^[1-2], 全钢子午线轮胎胎圈周向裂口是较常见的问题, 从其破坏的断面分析, 绝大多数的破坏从胎体反包端点开始出现裂缝, 逐渐蔓延至外部。

本工作通过仿真分析全钢子午线轮胎胎体反包端点处的受力情况, 研究设计参数对胎圈耐久性能的影响。

1 仿真判据

应变能密度(S)是应力和应变的综合考量, 其计算公式如下:

$$S = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon$$

式中, σ 为应力, ϵ 为应变。

S 反映改变单位体积所吸收或放出的能量大小。为了反映轮胎滚动过程中胎体反包端点处的变形情况, 仿真判据选择胎体反包端点部位圆周方向所有单元的 S 之和。

根据11.00R20轮胎不同设计方案胎圈耐久性试验数据建立仿真模型, 验证仿真判据的可靠性。

作者简介:姜洪旭(1981—), 男, 山东荣成人, 浦林成山(青岛)工业研究设计有限公司副主任工程师, 学士, 主要从事整车动力学仿真和轮胎NVH仿真以及轮胎六分力、高速均匀性、噪声试验研究工作。

E-mail: hxjiang@prinxschengshan.com

胎圈耐久时间与 S 的对应关系如表1所示。由表1可知, S 越小, 胎圈的耐久性能越好。

表1 胎圈耐久时间与 S 的对应关系

项 目	方 案		
	Model 1	Model 2	Model 3
耐久时间/h	40.45	54.55	48.35
$S/(J \cdot mm^{-3})$	1.06	0.97	1.03

注: Model 1中胎圈包布密度为50根·dm⁻¹, 角度为40°; Model 2中胎圈包布密度为60根·dm⁻¹, 角度为40°; Model 3中胎圈包布密度为50根·dm⁻¹, 角度为30°。

2 设计参数分析

设计参数分析采用Hyperstudy软件优化功能与ABAQUS软件非线性求解器相结合的方法, 其流程如图1所示。

2.1 胎圈包布

2.1.1 内端点高度

当胎圈包布内端点高度为35.0, 37.5, 40.0, 42.5和45.0 mm时, S 分别为3.481, 3.483, 3.483, 3.482和3.485 J·mm⁻³。可见, 胎圈包布内端点高度对 S 影响很小, 可推断胎圈包布内端点高度对胎圈开裂的影响较小。

2.1.2 角度和密度

胎圈包布角度和密度与 S 的关系如表2所示。胎圈包布角度和密度与 S 响应界面如图2所示。

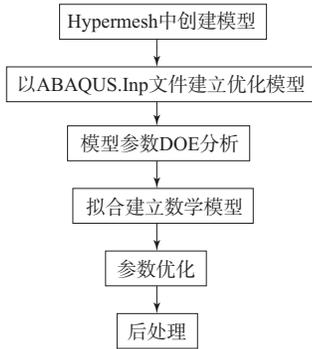


图1 设计参数分析流程示意

表2 胎圈包布角度和密度与S的关系

角度/(°)	密度/(根·dm ⁻¹)	S/(J·mm ⁻³)
60	200	6.500
60	100	6.700
45	200	7.000
45	100	7.000
45	67	7.000
45	50	7.000
30	200	7.433
30	100	7.438
30	67	7.440
30	50	7.444
15	200	7.000
15	100	7.000
15	67	7.000
15	50	7.000

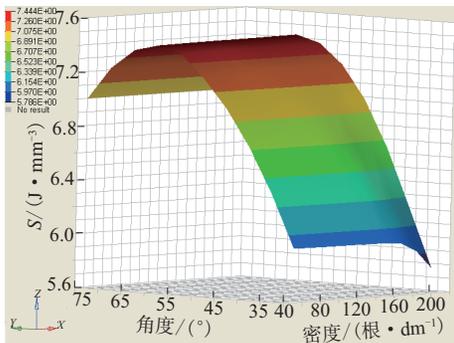


图2 胎圈包布角度和密度与S响应界面

由表2和图2可知,胎圈包布角度对胎体反包端点S影响显著,而胎圈包布密度对其影响不大。随着胎圈包布角度增大,S呈先增大后减小趋势,拐点出现在30°(产品设计角度)时。胎圈包布密度对S的影响与胎圈包布角度大小相关,在胎圈包布角度小于45°时,随着胎圈包布密度减小,S增大;在胎圈包布角度大于45°时,随着胎圈包布密度增大,S增大。

以S最小为优化目标,胎圈包布角度和密度最终优化结果如表3所示。

表3 胎圈包布角度和密度优化结果

角度/(°)	密度/(根·dm ⁻¹)	S/(J·mm ⁻³)
30	93	7.040 320 7
20	73	7.204 928 0
30	80	7.063 575 5
39	109	6.869 536 9
47	129	6.724 370 7
54	157	6.576 889 9
60	199	6.466 235 9
60	200	6.466 064 1

2.2 三角胶

2.2.1 模量

三角胶模量与S的关系如表4所示。三角胶模量与S响应界面如图3所示。

由表4和图3可知:当下三角胶模量取下限30

表4 三角胶模量与S的关系

上三角胶模量/MPa	下三角胶模量/MPa	S/(J·mm ⁻³)
10.000 000	30.000 000	3.013
16.666 667	30.000 000	2.676
23.333 333	30.000 000	2.503
30.000 000	30.000 000	2.417
10.000 000	43.333 333	2.888
16.666 667	43.333 333	2.712
23.333 333	43.333 333	2.436
30.000 000	43.333 333	2.434
10.000 000	56.666 667	2.813
16.666 667	56.666 667	2.649
23.333 333	56.666 667	2.543
30.000 000	56.666 667	2.502
10.000 000	70.000 000	2.798
16.666 667	70.000 000	2.719
23.333 333	70.000 000	2.677
30.000 000	70.000 000	2.622

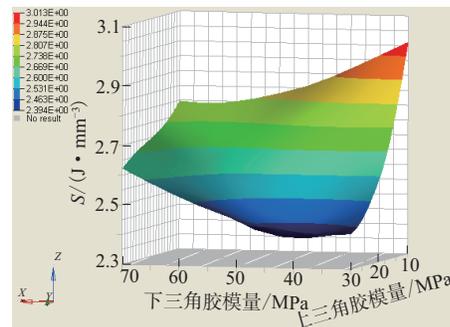


图3 三角胶模量与S响应界面

MPa、上三角胶模量取上限30 MPa时,即上、下三角胶模量相同时, S 最小。

2.2.2 高度

当三角胶高度为145.0,142.5,140.0和135.0 mm时, S 分别为7.080,7.002,7.021和7.038 $J \cdot mm^{-3}$ 。三角胶高度与 S 响应曲线如图4所示。

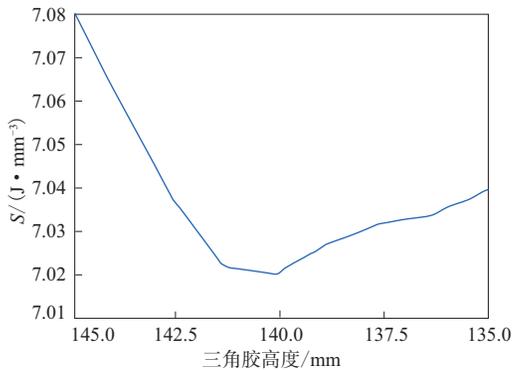


图4 三角胶高度与 S 响应曲线

由图4可知,三角胶高度由145 mm减小至135 mm, S 先减小后增大,拐点在140 mm处,说明三角胶高度存在最佳设计值。

2.2.3 下三角胶厚度

下三角胶厚度修改如图5所示。当下三角胶厚度增大0,1.67和2.50 mm时, S 分别为7.187,7.260和7.324 $J \cdot mm^{-3}$ 。下三角胶增大厚度与 S 响应曲线如图6所示。

从图6可以看出,在三角胶总厚度不变的情况下,随着下三角胶厚度的增大, S 增大。因此将下三角胶厚度增大2.5 mm,相应上三角胶厚度减小2.5 mm。

2.3 胎体和胎圈包布反包高度

保持胎圈包布反包高度不变,只改变胎体反包高度。胎体反包高度为72.0,74.5,77.0,79.5和82.0 mm时, S 分别为4.38,3.56,4.33,3.86和4.77 $J \cdot mm^{-3}$ 。可知,胎体反包高度在原有设计72

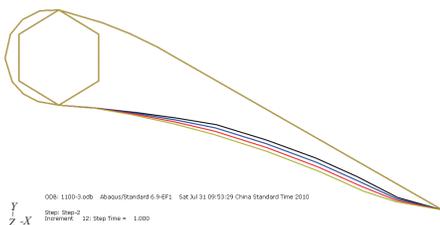


图5 下三角胶厚度修改示意

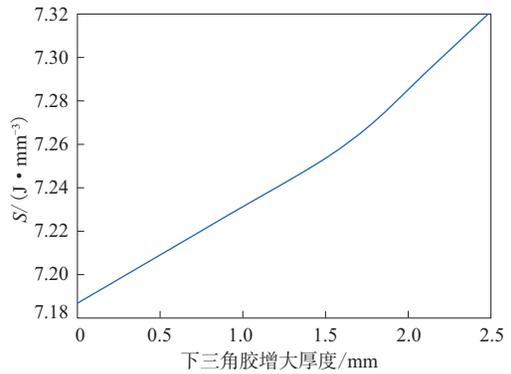


图6 下三角胶增大厚度与 S 响应曲线

mm的基础上逐渐增大至82 mm的过程中, S 整体变化不大。

胎体和胎圈包布反包高度等差级减小与 S 的关系如表5所示。

表5 胎体和胎圈包布反包高度与 S 的关系

胎体反包高度/mm	胎圈包布反包高度/mm	$S/(J \cdot mm^{-3})$
72.0	56.0	4.34
69.5	53.5	5.30
67.0	51.0	7.86
64.5	48.5	10.27
62.0	46.0	13.05

由表5可知,随着胎体和胎圈包布反包高度减小, S 逐渐增大。

2.4 胎圈内轮廓

胎圈内轮廓修改如图7所示。保持胎侧厚度不变,胎圈肩部内轮廓圆弧曲率半径增大,下胎侧部位内轮廓外移,胎肩垫胶、胎侧和三角胶的厚度相应增大。将内轮廓修改参数分别定义为prof7和prof8,为方便表征,采用修改后轮廓相对原轮廓的厚度增量表示轮廓修改程度。

胎圈内轮廓厚度增量与 S 的关系如表6所示。胎圈内轮廓厚度增量与 S 响应界面如图8所示。以 S 最小为优化目标,胎圈内轮廓最终优化结果如表

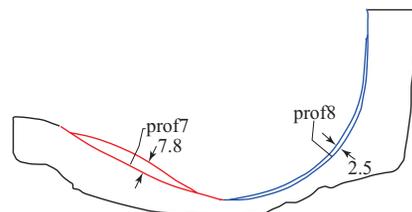


图7 胎圈内轮廓修改示意

表6 胎圈内轮廓厚度增量与 S 的关系

prof7增量/mm	prof8增量/mm	$S/(J \cdot mm^{-3})$
0	0	4.902
0	0.5	4.934
0	1.0	4.970
0	1.5	5.012
0	2.0	5.058
0	2.5	5.109
1.56	0	4.628
1.56	0.5	4.650
1.56	1.0	4.677
1.56	1.5	4.711
1.56	2.0	4.748
1.56	2.5	4.787
3.12	0	4.279
3.12	0.5	4.282
3.12	1.0	4.293
3.12	1.5	4.311
3.12	2.0	4.331
3.12	2.5	4.354
4.68	0	3.974
4.68	0.5	3.952
4.68	1.0	3.940
4.68	1.5	3.934
4.68	2.0	3.930
4.68	2.5	3.928
6.24	0	3.997
6.24	0.5	3.946
6.24	1.0	3.907
6.24	1.5	3.871
6.24	2.0	3.836
6.24	2.5	3.801
7.80	0	4.714
7.80	0.5	4.632
7.80	1.0	4.563
7.80	1.5	4.494
7.80	2.0	4.426
7.80	2.5	4.354

表7 胎圈内轮廓优化结果

prof7增量/mm	prof8增量/mm	$S/(J \cdot mm^{-3})$
0	0.300 0	4.923 0
1.287 0	0.300 0	4.694 0
0	0.575 0	4.939 0
0.780 0	0.050 0	4.761 0
1.560 0	0	4.628 0
2.340 0	0	4.463 0
3.120 0	0.250 0	4.280 0
3.919 1	0.500 0	4.092 0
5.118 8	0.250 0	3.917 0
6.991 7	0.500 0	4.166 0
3.934 1	0.250 0	4.093 0
5.138 4	0	3.932 0
6.239 5	0	3.997 0
6.933 7	0.084 5	4.190 0
5.508 0	0.260 7	3.503 0
5.632 3	0.269 9	3.504 0
5.737 3	0.276 9	3.508 0

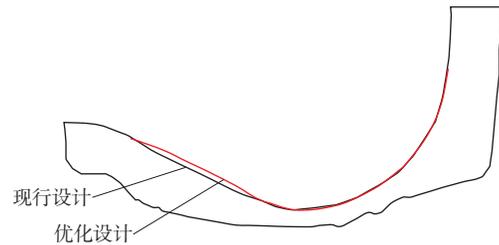


图9 优化后的胎圈内轮廓与现行胎圈内轮廓对比示意
由表7和图9可知,与现行胎圈内轮廓相比,优化后的胎圈内轮廓上胎侧和肩部接近,适当增大了下胎侧厚度,以提高胎圈的耐久性能。

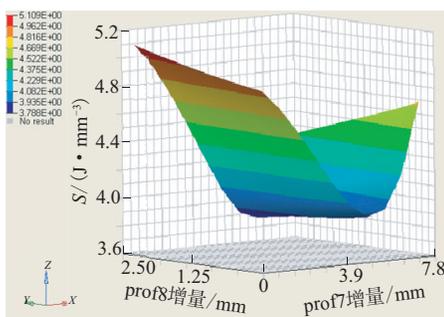
2.5 胎圈水平轴高度

胎圈水平轴高度(H)如图10所示。胎圈水平轴高度与 S 的关系曲线如图11所示。

由图11可知, H 与 S 呈非线性关系,但影响不大。

2.6 胎圈模具轮廓

胎圈模具轮廓设计参数定义如图12所示。胎圈模具轮廓与 S 的关系如表8所示。shape1

图8 胎圈内轮廓增量与 S 响应界面

7所示。优化后的内轮廓与现行内轮廓对比如图9所示。

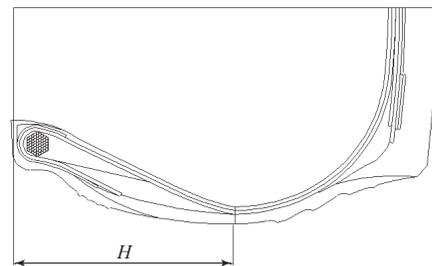


图10 胎圈水平轴高度示意

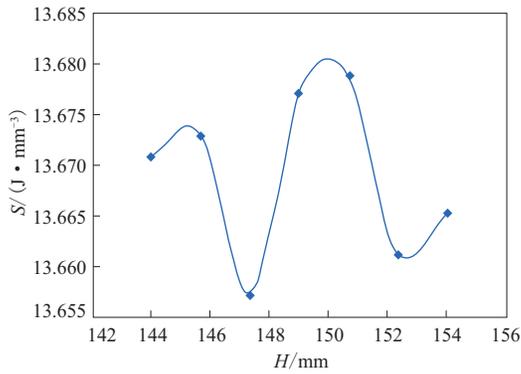


图 11 H与S的关系曲线

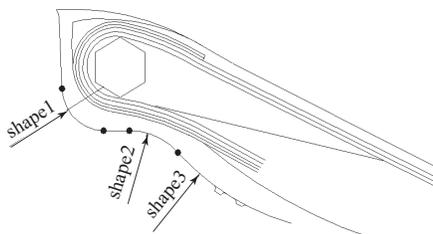


图 12 胎圈模具轮廓设计参数定义示意

表 8 胎圈模具轮廓与S的关系

shape1圆弧半径/mm	shape2圆弧半径/mm	shape3圆弧半径/mm	S/(J·mm ⁻³)
10.67	20.00	56.67	5.42
13.33	22.00	59.33	5.73
8.89	18.00	62.00	5.27
11.56	23.00	64.67	5.47
14.22	19.00	67.33	5.87
9.78	21.00	70.00	5.27
12.44	17.00	72.67	5.65
15.11	23.50	75.33	5.98
8.30	19.50	78.00	5.13
10.96	21.50	80.67	5.36
13.63	17.50	83.33	5.77
9.19	22.50	86.00	5.15
11.85	18.50	88.67	5.47
14.52	20.50	91.33	5.83
10.07	16.50	94.00	5.30
12.74	23.75	96.67	5.53
15.41	19.75	99.33	5.97
8.59	21.75	102.00	5.03
11.26	17.75	104.67	5.55
13.93	22.75	107.33	5.66
9.48	18.75	110.00	5.13
12.15	20.75	112.67	5.41
14.81	16.75	115.33	5.86
10.37	23.25	118.00	5.13
13.04	19.25	120.67	5.53
15.70	21.25	123.33	5.94
8.10	17.25	126.00	5.01

和shape2圆弧半径与S响应界面如图13所示。shape1和shape3圆弧半径与S响应界面如图14所示。shape2和shape3圆弧半径与S响应界面如图15所示。

以S最小为优化目标,胎圈模具轮廓最终优化结果如表9所示。优化后的胎圈轮廓与现行胎圈模具轮廓对比如图16所示。

由表8和9以及图13—16可知:shape1圆弧半径在8~16 mm取值范围内,圆弧半径越小,S越小;

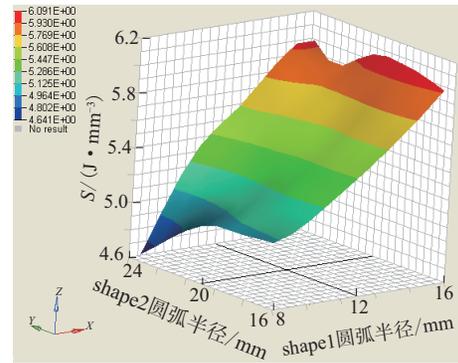


图 13 shape1和shape2圆弧半径与S响应界面

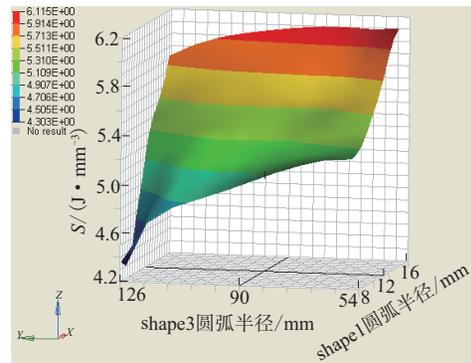


图 14 shape1和shape3圆弧半径与S响应界面

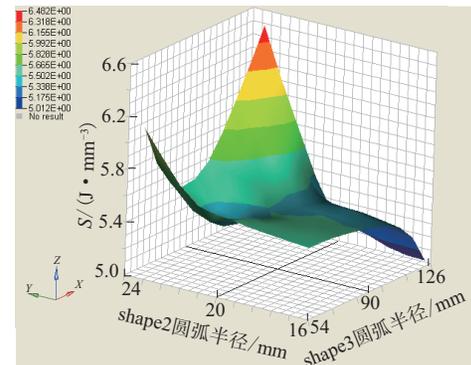


图 15 shape2和shape3圆弧半径与S响应界面

表9 胎圈模具轮廓优化结果

shape1圆弧半径/mm	shape2圆弧半径/mm	shape3圆弧半径/mm	$S/(J \cdot mm^{-3})$
12.0	20.0	90.0	5.461
12.0	20.0	101.9	5.424
12.0	18.7	90.0	5.480
13.3	20.0	90.0	5.655
11.6	20.4	93.6	5.399
11.2	20.8	97.2	5.335
10.8	20.4	100.8	5.267
10.4	20.6	104.4	5.213
10.0	21.0	108.1	5.154
9.4	21.4	113.6	5.072
8.4	21.8	122.3	4.951
8.0	21.6	126.0	4.915
8.0	22.0	126.0	4.913

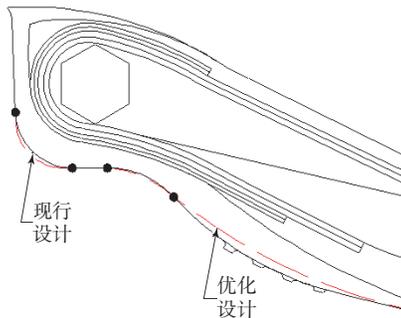


图16 优化后胎圈模具轮廓与现行胎圈模具轮廓对比示意

shape2圆弧半径取值范围为16~24 mm,在21 mm以内,随着圆弧半径增大, S 减小,超过21 mm后,圆弧半径对 S 影响很小;shape3圆弧半径取值范围为54~126 mm,在54~78和114~126 mm范围内,随着圆弧半径增大, S 减小,在78~114 mm范围内,圆弧半径对 S 影响不大。

2.7 胎圈着合宽度

冠部及肩部不作改变,胎圈着合宽度在原有设计基础上依次增大6.335,12.70,19.05和25.10 mm,同时设计断面宽度相应增大2.5,5,7.5和10 mm,将模型依次定义为TBW0,TBW1,TBW2,TBW3和TBW4。

胎圈着合宽度修改如图17所示。胎圈着合宽度与 S 的关系如表10所示。胎圈着合宽度与 S 响应曲线如图18所示。

由表10和图18可知,增大胎圈宽度有助于降低胎体反包端点位置的 S ,从而提高胎圈的耐久性能。

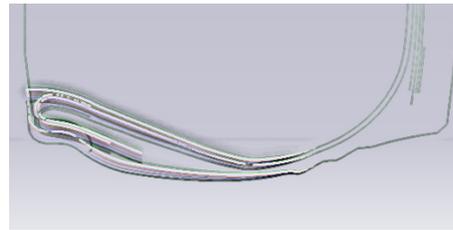
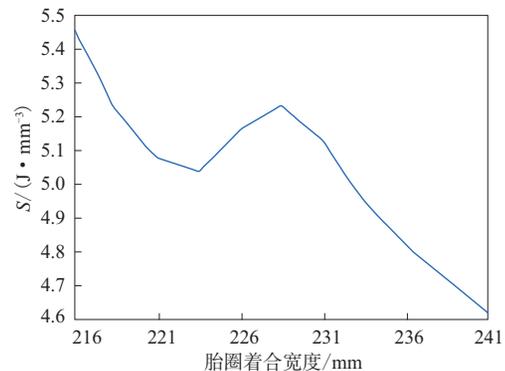


图17 胎圈着合宽度修改示意

表10 胎圈着合宽度与 S 的关系

模 型	胎圈着合宽度/mm	$S/(J \cdot mm^{-3})$
TBW0	216.00	5.462
TBW1	222.35	4.994
TBW2	228.70	5.234
TBW3	235.05	4.851
TBW4	241.40	4.608

图18 胎圈着合宽度与 S 响应曲线

2.8 钢丝圈排列

钢丝圈排列方案如图19所示。钢丝圈排列与 S 的关系如表11所示。

由表11可知,钢丝排列方式对 S 的影响较大。

2.9 钢丝圈直径

钢丝圈直径如图20所示。当钢丝圈直径为

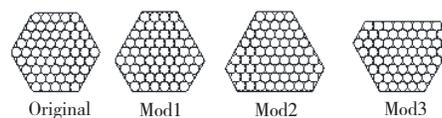


图19 钢丝圈排列方案示意

表11 钢丝圈排列与 S 的关系

方 案	钢丝排列方式	$S/(J \cdot mm^{-3})$
Original	5-6-7-8-9-8-7-6-5	3.347
Mod1	6-7-8-9-8-7-6-5-4	3.384
Mod2	8-9-10-9-8-7-6-5-4	3.162
Mod3	5-6-7-8-9-10-9-8	3.071

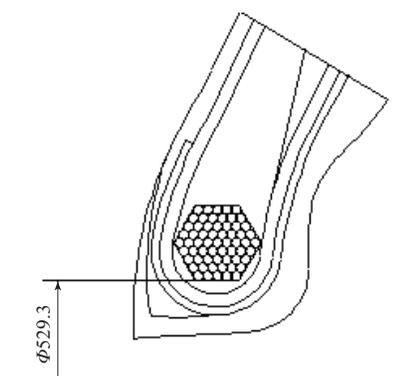


图20 钢丝圈直径示意

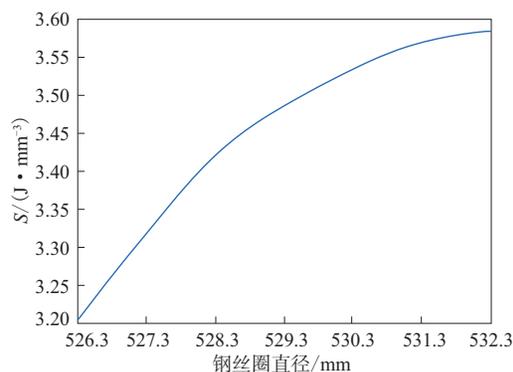
526.3, 527.8, 529.3, 530.8和532.3 mm时, S 分别为3.214, 3.340, 3.480, 3.565和3.580 $J \cdot mm^{-3}$ 。钢丝圈直径与 S 响应曲线如图21所示。

由图21可知,随着钢丝圈直径增大, S 几乎呈线性增大。因此,为提高胎圈耐久性能可适当减小钢丝圈直径。

3 结论

(1) 胎圈包布内端点高度和密度对胎圈耐久性能的影响较小,胎圈包布角度对胎圈耐久性能的影响显著。

(2) 上、下三角胶模量对胎圈耐久性能的影响呈非线性相关,且存在最佳匹配值;三角胶高度存在最佳设计值;增大下三角胶厚度,胎圈的耐久性能提高。

图21 钢丝圈直径与 S 响应曲线

(3) 胎体和胎圈反包高度及两者间等差级存在最佳匹配值。

(4) 适当增大内轮廓下胎侧厚度可提高胎圈的耐久性能。

(5) 胎圈水平轴高度对胎圈耐久性能的影响不大。

(6) 胎圈着合宽度增大有助于提高胎圈的耐久性能。

(7) 钢丝圈排列对胎圈耐久性能的影响较大,适当减小钢丝圈直径可提高胎圈的耐久性能。

参考文献:

- [1] 马良清. 汽车使用及案例分析[M]. 北京:中国商业出版社,2008.
- [2] 李昭,周浩,梁晨,等. 外轮廓和结构参数对载重子午线轮胎疲劳寿命的影响[J]. 橡胶工业,2017,64(5):290-294.

收稿日期:2019-03-04

Finite Element Study on Factors Affecting Bead Durability of All-steel Radial Tire

JIANG Hongxu¹, SUN Zongtao², LIU Changbo¹

[1. Prinx Chengshan (Qingdao) Industrial Research and Design Co., Ltd., Qingdao 266011, China; 2. Prinx Chengshan (Shandong) Tire Co., Ltd., Rongcheng 264300, China]

Abstract: The effect of design parameters on the bead durability of all-steel radial tire was investigated by finite element simulation. The design parameters studied in this paper included the endpoint height, angle and density of bead wrap, the modulus and height of apex, the thickness of lower apex, the turn-up height of carcass and bead wrap, the inner outline of bead, the horizontal axis height of bead, the mold outline of bead, the bead width at rim seat, the bead wire arrangement and diameter. By establishing the response relationship between design parameters with different values and simulation criteria (strain energy density), the effect of design parameters on the bead durability was obtained.

Key words: all-steel radial tire; bead; design parameter; finite element simulation; durability