# 高伸长钢丝帘线材料特性及其表征方式 对轮胎有限元仿真计算结果的影响

付新华,郭念贵,姜晓凤,韩志田,邓彩霞 (三角轮胎股份有限公司,山东威海 264200)

摘要:以3×7×0.20HE钢丝帘线为例,分别进行定负荷和定伸长循环加载测试,研究高伸长(HE)钢丝帘线的应力-应变曲线特性,分析不同伸长量卸载后的残余变形,并以某规格全钢载重子午线轮胎为例,分析轮胎静载接地印痕和带 束层钢丝帘线张力等。结果表明:采用考虑残余变形的修正模型表征HE钢丝帘线更合适;与无0°带束层设计方案相比, 有0°带束层设计方案带束层端部的应变能密度和剪应变幅值的差值均减小15%~20%,证实0°带束层具有减小带束层边 部变形、降低生热和提高胎肩刚性等作用。

关键词:全钢载重子午线轮胎;高伸长钢丝帘线;应力-应变曲线;残余变形;帘线张力;有限元仿真
中图分类号:TQ330.38<sup>+</sup>9;TQ336.1<sup>+</sup>1;O241.82
文章编号:1006-8171(2020)03-0183-06
文献标志码:A
DOI:10.12135/j.issn.1006-8171.2020.03.0183

■ (計画与作者交流)

高伸长(HE)钢丝帘线一般用于全钢载重子 午线轮胎最外层带束层、0°带束层和加强层等部 件。而HE钢丝帘线的应力-应变曲线与普通钢丝 帘线不同,因此对全钢载重子午线轮胎进行仿真 分析时选取的本构模型不同,得到的接地印痕和 REFOR(表征骨架材料张力)等结果相差很大。

本工作以3×7×0.20HE钢丝帘线为例,分别 进行定负荷和定伸长循环加载测试,研究HE钢丝 帘线特性并跟踪测量轮胎生产过程中钢丝帘线产 生的残余变形,进而在有限元分析中更好地表征 其材料特性,提高仿真分析的精度。

#### 1 帘线测试

帘线拉伸试验在我公司国家工程实验室的 GOTECH电子拉力机上进行,如图1所示。

# 1.1 不同结构钢丝帘线对比

全钢载重子午线轮胎带束层常用钢丝帘线的 应力-应变曲线对比如图2所示。3×7×0.20HE 钢丝帘线各股的捻向与合成股捻向相同且捻距较 小等结构特性导致其拉伸曲线与一般的高强度

E-mail:fuxinhua@triangle.com.cn

图1 电子拉力机



(HT)钢丝帘线的差异较大。

作者简介:付新华(1985—),男,山东莘县人,三角轮胎股份有限公司工程师,硕士,主要从事轮胎性能仿真及材料性能研究测试工作。

从图2可以看出:HE钢丝帘线的应力-应变曲 线可以分为"高伸长"和"高模量"两个阶段,0~2% 变形区间为"高伸长"段,HT钢丝帘线出现屈服甚 至破断;2%~5.7%变形区间为"高模量"段,应力 随变形幅度增大而急剧增大;高抗冲击(HI)钢丝 帘线伸长率也很大,但应力-应变曲线与HE钢丝帘 线差异较大。

3种钢丝帘线的具体物理性能如表1所示,其 中模量(*E*)由计算钢丝帘线应力-应变曲线的线性 段斜率得到。

衣! 个凹绐钩拗丝巾线彻埕住能刈	表1
------------------	----

项目	$3 \times 7 \times 0.20$ HE	$\begin{array}{c} 3 \times 0.2 + 6 \times \\ 0.35 \mathrm{HT} \end{array}$	5×0.30HI
破断力/N	1 540	1 960	680
破断伸长率/%	5.70	2.10	5.85
<i>E</i> /MPa	56 600	140 750	38 900

# 1.2 HE钢丝帘线循环测试

根据HE钢丝帘线的特性分别采用定负荷和定 伸长两种方式进行拉伸测试,对比分析不同伸长 量卸载后的残余变形。

#### 1.2.1 定负荷循环测试

定负荷250和1000 N时加卸载循环4次的测试 结果如图3所示。

从图3可以看出:加载250 N时3次测试应变均 约为2.5%,随加载次数增加没有产生残余变形;而 加载1000 N时,第1次拉伸应变约为3.6%,第2次 约为3.2%,出现残余变形,第3次约为3.1%,第4次 直至破断时伸长约5.2%(小于5.7%,正常测试)。 因此当加载1000 N时每次加载会产生新的残余变 形,且新的残余变形量逐渐减小。

#### 1.2.2 定伸长循环测试

定伸长2%,3%和4%时加卸载循环3次的测试 结果如图4所示。

从图4可以看出:4%定伸长时第2次较第1 次约有0.7%的残余变形;第3次相比第2次又产 生约0.7%的残余变形,并在约3.45%破断(小于 5.7%)。

分析上述两种测试结果可知:3×7×0.20HE 钢丝帘线在伸长小于3%时,每次循环基本不出现 残余变形,在不小于3.5%(迫近屈服点)定伸长时 每加载1次产生较明显的残余变形;HE钢丝帘线拉



图3 定负荷循环测试的应力-应变曲线

伸至屈服点时会产生明显的残余变形,且每加载1 次均产生新的残余变形,但随加载次数增加,残余 变形量逐渐减小。

#### 2 HE钢丝帘线用于0°带束层时仿真计算

HE钢丝帘线由于高伸长的特性,相对可以被 充分拉伸,所以常用于全钢载重子午线轮胎0°和最 外层带束层。以我公司生产的某规格轮胎为例, 考虑生产过程中0°带束层钢丝帘线的实际伸长量, 研究线弹性模型和考虑残余变形的修正模型表征 3×7×0.20HE钢丝帘线材料特性对轮胎带束层钢 丝帘线张力和接地印痕等参数的影响<sup>[1-2]</sup>。

#### 2.1 伸长量跟踪测试

根据半成品部件尺寸、成型后轮胎尺寸、成型 附鼓周长和帘布层厚度等并结合3个测点距0°带束 层的高度计算,HE钢丝帘线在该规格轮胎中的伸 长率为0.92%~1.07%。测点位置及其距0°带束



**图4 定伸长循环测试的应力-应变曲线** 层高度测量如图5所示。

图5中测点1为胎冠中心,测点2和3分别为左 右外侧花纹沟外侧,实际测量结果如表2所示。

考虑残余变形的3×7×0.20HE钢丝帘线应 力-应变曲线如图6所示。

有限元分析的起点是硫化后的成品轮胎,根 据计算得到的帘线伸长量,认为在制造过程中的



(a)测点位置



(b)高度测量

#### 图5 测点位置及其距0°带束层高度测量示意

表2 不同测点参数统计

而日	测量位置				
	1	2	3		
模具尺寸/mm	3 370.9	3 335.7	3 320.7		
成品轮胎尺寸/mm	3 3 5 5	3 318	3 307		
收缩率/%	0.47	0.53	0.41		
距0°带束层高度/mm	—	21.0	18.5		





残余变形约为1%,即硫化完成后约有17 MPa的残 余应力。仿真分析时输入的是去除1%变形的应 力-应变曲线,其弹性模量约为56 600 MPa(为该 曲线两个绿色测点之间的斜率)。

# 2.2 两种表征方式仿真结果对比

# 2.2.1 接地印痕

分别应用线弹性模型和修正模型表征0°带束 层钢丝帘线,轮胎试验及有限元分析得到的接地 印痕如图7所示。





由图7可见,两种表征方式得到的接地印痕差 异明显,应用修正模型表征得到的接地印痕与试 验结果更吻合。

两种表征方式部分接地印痕参数与试验接地 印痕的对比如表3所示。



(b)线弹性模型 图7 轮胎仿真与试验接地印痕对比

表3 两种表征方式轮胎有限元分析接地印痕参数与

试验结果对比						
项目	线弹性模型	修正模型	试验			
矩形比	1.36	1.03	1.01			
胎肩沉降指数	0.84 0.93		0.95			
肩部肋内外长度比	0.79	0.91	0.93			
印痕宽度/mm	279.8	281.6	282.2			
中心长度/mm	255.1	223.1	221.7			

从表3可以看出,修正模型得到的结果与试验 结果接近,用线弹性模型表征得到的仿真结果与 试验值严重不符。线弹性模型表征时0°带束层的 强度比实际偏大,导致0°带束层会紧紧束缚肩部区 域,从而在充气时肩部膨胀偏小,使接地时肩部肋 条长度较小。

# 2.2.2 帘线张力

分析4层带束层和0°带束层在轮胎充气和加载 时钢丝帘线张力的极值,结果如表4所示。

表4 两种表征方式带束层钢丝帘线张力极值对比 N

修正 268/306 420/453 115/122 102/108 109/414	本构	1 <sup>#</sup> 带	2 <sup>#</sup> 带	3 <sup>#</sup> 带	4 <sup>#</sup> 带	0°带
线弹性 193/267 351/404 144/150 102/106 378/707	模型	束层	束层	束层	束层	束层
	修正	268/306	420/453	115/122	102/108	109/414
	线弹性	193/267	351/404	144/150	102/106	378/707

注: "/"前后数值表示仅充气/加载(0.9 MPa/4 500 kg)。

通过分析可以发现:用线弹性模型表征的0°带 束层张力明显比修正模型大,充气时差别在3倍以 上,加载时相差1.7倍;用线弹性模型表征的1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup> 带束层的张力比修正模型小,相差20%~40%;用 线弹性模型表征的3<sup>#</sup>带束层张力比修正模型大;两 种表征方式得到的4<sup>#</sup>带束层张力基本一致。

### 2.2.3 不同工况下0°带束层变形

应用修正模型分析不同充气压力和加载工况 下各帘布层的张力情况。首先比较不同工况下0° 带束层钢丝帘线的变形量,结果如表5所示。

表5 不同测试工况下0°带束层钢丝帘线的变形量 %

测试工况	硫化后	充气	加载	合计
0.9 MPa/4 500 kg	1	1.10	0.45	2.55
1.2 MPa/6 000 kg	1	1.30	0.40	2.70
1.5 MPa/7 500 kg	1	1.50	0.35	2.85
1.8 MPa/9 000 kg	1	1.65	0.35	3.00
1.2 MPa/7 500 kg	1	1.30	0.42	2.72
1.2 MPa/9 000 kg	1	1.30	0.44	2.74

通过分析可以发现:随充气压力增大,0°带束 层钢丝帘线的变形量明显增大,而当充气压力固 定时,随负荷增大,变形量略微增大;在1.2 MPa/ 9 000 kg(超载100%)工况下,0°带束层钢丝帘线的 总变形小于3%,可以认为0°带束层钢丝帘线随加 载次数的增加基本不会产生残余变形;充气压力 提高到1.8 MPa且超载100%时的总变形为3%,此 时也没有到帘线的屈服点。

不同工况下0°带束层钢丝帘线的变形量不同,

帘线张力也会随之变化,同时其他带束层钢丝帘 线张力也相应发生改变,具体数据如表6所示。

通过分析可以发现:在仅充气状态下,随充气 压力增大,0°带束层的钢丝帘线张力增大幅度大于 其他带束层;充气压力为0.9 MPa时0°带束层的钢 丝帘线张力与4<sup>#</sup>带束层相当;充气压力提高至1.2 MPa时介于4<sup>#</sup>与2<sup>#</sup>带束层之间;当充气压力继续提 高到1.5 MPa后与1<sup>#</sup>带束层相当。

表6 部分工况下带束层钢丝帘线张力对比

工 况	0°带束层	1#带束层	2 <sup>#</sup> 带束层	3 <sup>#</sup> 带束层	4 <sup>#</sup> 带束层
0.9 MPa/4 500 kg	109/414	268/306	420/453	115/122	102/108
1.2 MPa/6 000 kg	241/560	341/363	552/544	165/168	139/141
1.5 MPa/7 500 kg	370/694	410/416	673/668	221/223	176/175
1.8 MPa/9 000 kg	488/813	474/478	790/788	279/281	213/211

注:"/"前后表示仅充气/加载后的钢丝帘线张力。

加载后除0°带束层外,其他带束层钢丝帘线张 力与充气状态下相当,而0°带束层钢丝帘线张力比 仅充气状态增幅大,这是由于轮胎加载接地后0°带 束层钢丝帘线产生新变形导致的。此时0°带束层 会牢牢束缚带束层端部,减小带束层之间的相互 作用,同时提高了胎肩区域的刚性。

# 2.2.4 0°带束层设计对轮胎肩部受力的影响

首先比较有无0°带束层结构轮胎带束层帘布 的张力分布。标准负荷工况下2<sup>#</sup>带束层的张力分 布如图8所示。

从图8可以看出,与0°带束层结构相比,无0°带 束层设计时带束层中心区域张力减小而两侧(胎 肩区域)增大,极值增幅约15%,工况改变,幅值也 随之改变。

标准负荷工况下带束层端部的应变能密度和 剪应变幅值对比如图9所示。

从图9可以看出,有0°带束层设计方案带束层

端部的应变能密度和剪应变幅值的差值均减小 15%~20%。这也印证了0°带束层设计可减小带 束层边部变形,同时降低变形生热,进而提高肩部 耐疲劳损坏和热破坏的能力,尤其是在超载工况



束层自由断面;▼—无0°带束层接地断面。

图8 标准负荷工况下2<sup>#</sup>带束层的张力分布



图9 标准负荷工况下带束层端部的应变能密度和剪应变幅值对比

Ν

下更明显,此外还可提高胎肩刚性,缓解轮胎肩部 磨损问题。

#### 3 结论

通过测试分析了HE钢丝帘线的特性,并以某 规格全钢载重子午线轮胎为例,跟踪测试0°带束层 钢丝帘线在生产过程中的残余变形,比较线弹性 模型和修正模型两种表征方式对轮胎有限元仿真 结果精度的影响等,主要得到如下结论。

(1)采用考虑残余变形的修正模型表征HE钢 丝帘线更合适。

(2)与无0°带束层设计方案相比,有0°带束层 设计方案带束层端部的应变能密度和剪应变幅值 的差值均减小15%~20%,证实0°带束层具有减 小带束层边部变形、降低生热和提高胎肩刚性等作用。

需要注意的是,不同规格、不同花纹深度的轮胎在生产过程中的残余变形量不同。此外,本研究所用修正模型主要用以表征HE钢丝帘线的"高模量"和"高伸长"特性,而该模型本质上是一种超弹性模型,用于表征钢丝帘线也不是很适宜,可以选择开发更合适的模型表征HE钢丝帘线的特性。

# 参考文献:

[1] 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): 121-127.

[2] Gent A N, Walter J D. The Pneumatic Tire[M]. Washington, USA: NHTSA, 2005:89–99.

收稿日期:2019-11-13

# Effect of Material Characteristics and Characterization of High Elongation Steel Cord on Results of Tire Finite Element Simulation

FU Xinhua, GUO Niangui, JIANG Xiaofeng, HAN Zhitian, DENG Caixia (Triangle Tire Co., Ltd, Weihai 264200, China)

Abstract: Taking  $3 \times 7 \times 0.20$ HE steel cord as an example, the stress-strain relationship of high elongation (HE) steel cord under cycles of loading and unloading with constant load and constant elongation were investigated, the residual deformation after unloading at different elongation was analyzed, and the static loading contact footprint and belt steel cord tension of the tire were studied using a certain type of truck and bus radial tire. The results showed that the modified constitutive model considering residual deformation was more suitable for characterizing HE steel cord. Compared with the design without 0° belt, the differences of extreme values of strain energy density and shear strain at the belt end in the design with 0° belt were smaller by  $15\% \sim 20\%$ . With the 0° belt, the deformation at the edge of the belts decreased, the heat build-up was reduced and the rigidity of tire shoulder was improved.

Key words: truck and bus radial tire; high elongation steel cord; stress-strain curve; residual deformation; cord tension; finite element simulation

#### 一种白度稳定的白色胎侧胶及其制备方法

由赛轮集团股份有限公司申请的专利(公开 号 CN 110396253A,公开日期 2019-11-01) "一种白度稳定的白色胎侧胶及其制备方法",胎 侧胶配方为:天然橡胶 15~75,氯化丁基橡胶 20~50,三元乙丙橡胶 5~50,硫黄预分散胶 母粒 1~5,高岭土 10~50,碳酸钙 0~50, 氧化锌 1~10,硬脂酸 0.5~2,高温防护蜡 0.5~2.5,低温防护蜡 0.5~3.5,防老剂 0.5~3.5,二氧化钛 10~50,群青 0~3,硫化 剂 0.5~5,促进剂 1~3。其中硫黄预分散胶 母粒由天然橡胶、硫黄、脂肪酸酯类分散剂组成。 胎侧胶采用脂肪酸酯类分散剂,可以有效提高硫 黄分散度,保证硫黄活性,有效防止白色轮胎胎侧 变色。

(本刊编辑部 储 民)