宽基轮胎成型中胎体帘线弯曲问题的分析与改进

朱茂桃1,魏新龙1,王国林1,梁 晨1,王庆念2

(1. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 风神轮胎股份有限公司, 河南 焦作 454000)

摘要:以435/50R19.5宽基全钢载重子午线轮胎为研究对象,利用Abaqus软件模拟了轮胎的成型过程,主要包括成型机主鼓部件贴合、辅助鼓部件贴合、半成品成型和硫化机内定型。通过成型仿真和分析发现,硫化机内定型后胎体帘线受压是引起宽基轮胎成型过程中胎体帘线弯曲的主要因素。从施工设计角度提出抑制胎体帘线弯曲的方法,并进行样品轮胎试制。对试制轮胎断面切割分析验证了方法的有效性。

关键词:载重子午线轮胎;宽基轮胎;成型仿真;胎体帘线弯曲

中图分类号:U463.341;TQ330.38⁺9 文献标志码:B 文章编号:1000-890X(2016)09-0551-05

汽车运输业的飞速发展对轮胎的安全、环保、 降耗以及生产技术方面提出了更高的要求,载重 子午线轮胎的宽基化、高性能化成为轮胎技术的 主要发展趋势。宽基载重轮胎是指断面高宽比为 0.65及以下的轮胎。宽基轮胎单胎替代普通轮胎 并装双胎,具有轮胎和轮辋总成质量小、承载能力 大、安装空间小等优点^[1]。

国内宽基轮胎的生产还处于起步阶段,生产 技术也主要依赖传统的生产经验,胎体帘线弯曲 (如图1所示)是宽基轮胎制造过程中出现的主要 问题之一。胎体帘线弯曲涉及到轮胎结构设计、 施工设计和成型等多个环节,特别是施工设计和 成型过程对宽基轮胎胎体帘线弯曲与否起决定性 的作用。轮胎仿真技术的发展为解决轮胎在施工 设计和成型过程中出现的问题提供了一个可行的 方法。李慧波^[2]利用计算机仿真技术,改变传统设 计中厚度成品断面图中均匀分布的假设,分段计 算胎体层和内衬层厚度,使施工设计精度得到提 高,但该方法没有对三角胶、胎肩垫胶等重要部件 进行研究。M.J. Luneau^[3]对胎面胶成型过程进行 了有限元仿真,并进行了相应的试验验证。颜超^[4] 采用ANSYS FLOTRAN CFD软件对内衬层挤出 成型进行了有限元仿真,研究了机头流道内流体 的流动规律和物料的幂律指数。王国林等^[5]采用



图1 胎体帘线弯曲

Marlow橡胶本构模型模拟混炼胶的力学性能、 Rebar单元模拟钢丝帘线对橡胶的增强作用,利用 Abaqus软件对12.00R20全钢载重子午线轮胎的成 型过程进行了有限元模拟,仿真结构与实际轮胎 结构具有良好的一致性;采用广义Maxwell模型描 述混炼胶的力学行为、Rebar模型模拟橡胶帘线复 合材料,利用Abaqus软件对385/55R22.5全钢载重 子午线轮胎的成型过程和硫化机内定型进行了有 限元模拟,仿真结构与实际结构具有很好的一致 性^[6];利用POLY FLOW软件对轮胎胎面胶共挤出 成型进行了有限元仿真研究,分析了流道长度对 共挤出质量的影响^[7]。

本工作基于Abaqus软件,对435/50R19.5宽基 载重子午线轮胎的成型过程进行有限元仿真,分 析胎体帘线弯曲的成因,并提出解决方案。

1 混炼胶本构模型和单元类型的选取

1.1 混炼胶本构模型

混炼胶是一种流变体,目前描述材料粘弹 性流变行为的力学模型主要有Kelvin固体模型、 Maxwell流体模型、Burgers模型和广义Maxwell模 型等。A. Paul等^[8]采用非线性Maxwell模型描述 了炭黑填充橡胶部件的力-位移模型,并证明了广 义Maxwell模型可以较好地描述混炼胶的松弛特

基金项目:中国博士后基金资助项目(2014M551509)

作者简介:朱茂桃(1963一),男,江苏扬中人,江苏大学教授,博士,主要从事汽车零部件设计研究。

性。因此,本研究采用广义Maxwell模型来模拟混 炼胶的力学行为,微分型方程如下^[9]:

$$\sum_{k=0}^{m} p_k \frac{\mathrm{d}^k \sigma}{\mathrm{d}t^k} = \sum_{k=0}^{n} q_k \frac{\mathrm{d}^k \varepsilon}{\mathrm{d}t^k}$$
(1)

式中, σ 为应力, ε 为应变, p_k 和 q_k 为决定于材料性质的常数, $-\Re q_0=1$ 。

在Abaqus有限元软件中, 广义Prony模型与广 义Maxwell模型有相同的数学描述。因此, 本研究 采用广义Prony模型进行混炼胶粘弹性的数值模 拟。该模型采用如下积分型本构关系:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau}(t) = G_0 \int_0^t g_R(t-s) \boldsymbol{\gamma}(s) \mathrm{d}s \\ \boldsymbol{p}(t) = -K_0 \int_0^t k_R(t-s) \boldsymbol{\varepsilon}(s) \mathrm{d}s \end{cases}$$
(2)

式中, τ 和p为应力偏张量和球张量, G_0 和 K_0 为瞬 时剪切模量和体积模量, g_R 和 k_R 为归一化的剪切 和体积松弛模量, γ 和 ε 为偏应变张量和体应变张 量,t为当前时间,s为过去时间。 g_R 和 k_R 可写为

$$\begin{cases} g_{R} = 1 - \sum_{i=1}^{N} \bar{g}_{i}^{P} (1 - \exp(-t/\tau_{i}^{G})) \\ k_{R} = 1 - \sum_{k=1}^{M} \bar{k}_{i}^{P} (1 - \exp(-t/\tau_{i}^{K})) \end{cases}$$
(3)

式中, \bar{g}_i^r , \bar{k}_i^r , τ_i^c 和 τ_i^r 为材料常数。

1.2 本构模型参数的试验确定

1.2.1 松弛试验及广义Prony模型的参数拟合

采用美国阿尔法科技公司的RPA2000橡胶加 工分析仪测定轮胎各部件胶料的剪切松弛模量, 并对试验数据进行归一化处理,拟合得到Prony级 数的各项参数。

试验时,剪应变给定3.58°,松弛时间设为180 s,由于半成品成型过程在恒温下进行,且在硫化 模具中,胶料流动进入花纹沟的时间非常短暂,因 此,试验温度设为25 ℃,得到归一化剪切松弛模量 曲线如图2所示。

1.2.2 超弹性模型参数拟合

在Abaqus软件中,必须定义材料行为的率无 关部分,在小变形和大变形的情况下,可分别选用 线弹性和超弹性模型。由于轮胎成型属于大变形 行为,因此,选用Marlow超弹性本构模型来定义材 料的率无关部分。Marlow模型本构方程为

$$U = U_{\rm D}(\bar{I}_{\rm I}) + U_{\rm V}(J_{\rm e}) \tag{4}$$

式中,U为应变能密度,U_D表示偏量部分,U_v表示体积部分,*I*_i表示应变张量的第一不变量,*J*_e表示



图2 广义Prony模型松弛模量拟合

弹性体积系数。

超弹性模型和粘弹性模型联合定义的本构方 程为

$$\begin{cases} U_{\rm D}(t) = U_{\rm D}^{0} [1 - \sum_{i=1}^{N} \bar{g}_{i}^{P} (1 - \exp(-t/\tau_{i}^{G}))] \\ U_{\rm V}(t) = U_{\rm V}^{0} [1 - \sum_{k=1}^{M} \bar{k}_{i}^{P} (1 - \exp(-t/\tau_{i}^{K}))] \end{cases}$$
(5)

式中,U[®]和U[®]表示t=0时的应变能密度偏量部分和 体积部分,[]内的项表示归一化的剪切和体积松弛 模量。

利用Abaqus中的Marlow本构模型拟合混炼 胶单轴拉伸试验得到的数据曲线如图3所示。通 常在成型过程中胶料的应变值小于200%,由图3可 知,在该应变范围内试验结果与Marlow本构模型 拟合曲线具有良好的一致性。



图3 Marlow本构模型拟合

1.3 单元类型的选择

在成型模拟过程中,将轮胎简化为二维轴 对称模型。橡胶部分采用四边形轴对称单元 (CGAX4H)和三角形轴对称单元(CGAX3H)^[10]。 利用Rebar Layer模型模拟钢丝帘线,帘线-橡胶复合材料的定义方法是将Rebar单元定义在面单元上,再将面单元嵌入实体单元中。

2 轮胎成型过程的模拟

轮胎成型过程的模拟参照三鼓式一次成型 法工艺,其成型过程主要包括成型机主鼓部件贴 合、辅助鼓部件贴合、半成品成型和轮胎花纹成型 4个工艺过程^[11]。因轮胎的花纹成型对所要研究 的问题影响较小,且考虑计算效率,故忽略,即采 用光面轮胎进行硫化机内定型。以某轮胎公司的 435/50R19.5宽基全钢载重子午线轮胎为研究对 象,对上述4个工艺过程进行有限元模拟。

2.1 成型机主鼓部件贴合

在成型机主鼓上分别对以下部件进行依次贴 合:胎侧、耐磨胶、胶片、内衬层、下内衬层、加强 层、胎体层和带束层下垫胶。该过程利用混炼胶 的粘合性使不同胶料紧密粘合在一起并消除胶料 端部结合处的间隙。分别建立部件的有限元分析 模型,采用施加均布压力的方法模拟贴合过程。 主鼓部件贴合前后如图4所示。





2.2 成型机辅助鼓部件贴合

在成型机辅助鼓上分别对以下部件进行依次 贴合:1[#]带束层、2[#]带束层、3[#]带束层、4[#]带束层和胎 面胶。分别建立部件的有限元分析模型,采用施 加两段均布压力的方法模拟贴合过程,胎肩处压 力略大于胎冠中心处压力。辅助鼓部件贴合前后 如图5所示。

2.3 半成品成型和硫化机内定型

半成品的成型过程主要包括充气和胎侧反包 两个步骤。模拟充气过程时,在轮胎内表面施加



图5 辅助鼓部件贴合

均匀压力载荷;胎侧反包仿真时,根据施工参数将 钢丝圈、贴合后的带束层、胎面和胎体部分定位。 轮胎硫化机内成型过程通常是在胶囊式定型硫化 机内进行,首先将胶囊内抽真空,再将胎坯套在胶 囊外面,胶囊内部压强增大至0.9 MPa,对胎坯进 行定位,最后进行合模,胶囊内部压强增大至2.6 MPa,完成机内硫化定型。具体模拟过程如图6和7 所示。

2.4 仿真断面与实测断面对比

为了验证仿真的可靠性,将仿真得出的断面 结构与实测轮胎断面进行了对比,如图8所示。由 于实测断面各胶料的分界面不清晰,导致某些厚 度较小的胶料难以准确测绘。因此,本研究只对 主要胶料进行对比。

此外,为了分析轮胎胶料厚度仿真结果的精度,选取*B-B*,*D-D*,*E-E* 3个位置(如图9所示)的胶料厚度进行对比分析,结果见表1。

由表1可以看出,仿真得出的胶料形状与实际 胶料形状具有良好的一致性,且与实际轮胎胶料 厚度的相对误差都在10%以内,说明了轮胎成型仿 真结果的可靠性。

3 胎体帘线弯曲成因及改进

导致轮胎胎体帘线弯曲的原因很多,弯曲形 式也多种多样,胎冠中心处弯曲在宽基轮胎的生 产中较为常见。宽基轮胎断面较宽,半成品成型 过程中,在胎面胶及带束层的重力、胎面滚压和带 束层对胎体箍紧作用的影响下,胎冠处胎体帘线 下凹现象比较严重。硫化机内定型过程中,胎肩 处胶料较厚,首先接触到模具,在G-G和H-H处形







(c)实际断面结构

1—耐磨胶;2—钢丝圈;3—加强层;4—三角胶;5—型胶;6—胎侧 胶;7—胎体层;8—下内衬层;9—内衬层;10—胎面胶;11—下胎面 胶;12—1[#]带束层;13—2[#]带束层;14—3[#]带束层;15—4[#]带束层。





表1 3个位置厚度比较			
位 置	仿真厚度/mm	实际厚度/mm	相对误差/%
B-B			
胎侧胶	5.98	5.57	7.3
胎体层	1.53	1.59	3.8
下内衬层	1.24	1.36	8.8
内衬层	1.43	1.53	6.5
D-D			
胎面胶	17.29	17.43	0.8
3 [#] 带束层	2.18	2.40	9.2
2 [#] 带束层	2.23	2.46	9.3
1 [#] 带束层	1.79	1.98	9.6
胎体层	1.50	1.66	9.6
下内衬层	1.61	1.66	3.0
内衬层	1.80	1.94	7.2
E-E			
胎面胶	16.15	15.59	3.6
4 [#] 带束层	1.63	1.54	5.9
3 [#] 带束层	2.51	2.63	7.8
2 [#] 带束层	2.15	2.25	4.4
1 [#] 带束层	1.90	2.03	6.4
胎体层	1.43	1.53	6.5
下内衬层	1.68	1.50	8.7
内衬层	1.72	1.58	8.8

成支点(如图10所示)。在两支点之间,胎体帘线 实际长度大于理论长度,随着硫化胶囊内部过热 水压力的逐渐增大,胎冠中心处的胎体帘线逐渐 受到压缩,出现弯曲现象。



图10 硫化机内定型前后胎体帘线实际位置和理论位置

成型过程中钢丝帘线受拉时,内应力为正,不 会弯曲;反之,受压时内应力为负,则会弯曲。因 此,在成型仿真过程中,用硫化机内定型后胎体帘 线应力判断胎体帘线是否弯曲。图11所示为硫化机 内定型后胎体帘线应力从胎冠中心到胎肩处的变 化趋势。由图11可知,从胎冠中心到胎肩,胎体帘线 应力逐渐增大,且在胎冠中心处出现受压现象。

改善胎冠中心处胎体帘线的受压状态有以下 几种方法。

(1)改变硫化胶囊的结构,使胶囊先将胎冠中 心处撑起,然后撑起胎肩和胎侧。

(2)通过减弱带束层对胎体的箍紧作用,可以 减小胎体下凹的程度。



图11 硫化机内定型后 F-F到 C-C处胎体帘线应力

(3)减小胎圈平宽,从而降低胎体帘线在胎肩 处的位置。

为此,本研究提出4种方案减小胎冠中心处胎体帘线受压,并分别进行轮胎成型有限元模拟仿 真。方案1:改变压力载荷施加顺序,先对胎冠中 心附近施加压力载荷,然后对整个内轮廓施加压 力载荷;方案2:辅助鼓半径(*R*)增大2和4 mm;方 案3:胎圈平宽(*L*)减小4和8 mm;方案4:*R*增大2 mm,且*L*减小4 mm。

4个方案机内硫化定型后胎体帘线应力分布 如图12所示。由图12可知,4个方案均达到了胎 体帘线应力为正值的目的。方案1虽然能够直接 解决胎体帘线弯曲的问题,但需要对硫化胶囊的 结构形式进行修改,而且难以控制其充气变形状 态。方案2中带束层和胎面胶的裁断长度分别增 加约12.6和25.2 mm,不仅增加了轮胎加工成本,



2一辅助鼓半径增大4 mm;3一胎圈平宽减小8 mm;

4一胎圈平宽减小4 mm。

图12 4个方案硫化机内定型后胎体帘线应力

而且对轮胎的某些性能和车辆的燃油经济性也有 不利影响。方案3中,L减小4 mm后,胎体帘线受力 很不均匀,胎肩和胎冠中心处胎体帘线力差距较 大,而L减小8 mm后,在硫化机内定型过程中容易 出现胎圈露线的现象。因此,采用方案4进行轮胎 试制。试制轮胎切割断面胎体帘线状态如图13所 示。由图13可知,本研究提出的方法可以较好地 解决了胎冠中心处胎体帘线弯曲现象。



4 结论

利用有限元分析方法,对435/50R19.5宽基全 钢载重子午线轮胎成型工艺进行了有限元仿真,分 析了胎体帘线弯曲的原因,提出在成型仿真过程中 利用机内硫化定型后的胎体帘线应力来判断胎体 帘线是否弯曲。提出了抑制胎体帘线弯曲的方案, 样胎试制结果表明了所提出方案的有效性。

参考文献:

- [1] 黄家明. 宽基轮胎的概况[J]. 橡胶科技市场, 2011, 12(3):8-12.
- [2] 李慧波. 轮胎施工设计的仿真[J]. 轮胎工业, 1999, 19(12): 723-726.
- [3] Luneau M J. Investigation of Methods for Three Dimensional FEA Simulation of Truck Tire Retread Molding[D]. South Carolina: University of South Carolina, 2006.
- [4] 颜超.子午线轮胎细致模型与胶片挤出成型的有限元分析[D].北 京:北京化工大学,2008.
- [5] 王国林,张建,朱美林,等.子午线轮胎成型过程有限元仿真分析[J]. 橡胶工业,2012,59(6):352-356.
- [6] 王国林,杜小伟,朱美林,等.轮胎成型有限元仿真研究[J]. 工程力 学,2012,29(6):265-269.
- [7] 王国林,刘高君,王磊.轮胎胎面胶料共挤出成型的有限元仿真研究[J].材料工程,2014(2):51-54.
- [8] Paul A, Amer H, Hugh G. Measurement and Modeling of Carbon Black Filled Natural Rubber Components [J]. International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing, 2007, 2 (4):315–344.
- [9] 杨挺青. 粘弹性力学[M]. 上海:华东理工大学出版社, 1990.
- [10] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [11] 俞淇,丁剑平,张安强,等.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.

第8届全国橡胶工业用织物和骨架材料技术研讨会论文