

成型辅鼓直径对轮胎耐久性能的影响

胡海明, 武凯迪*

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要: 基于Abaqus软件, 对275/65R17轮胎进行有限元分析, 研究成型辅鼓直径(D')对轮胎耐久性能的影响。结果表明: 当 D' 变化时, 轮胎带束层拉伸率、带束层角度、带束层密度、胎体拉伸率和冠带层拉伸率均发生变化; 随着 D' 的减小, 轮胎各部位应力和温度先降低后升高, 当 D' 为726.76 mm时轮胎整体应力和温度最低, 轮胎耐久性能最好。

关键词: 辅鼓直径; 轮胎; 成型; 耐久性能; 有限元分析

中图分类号: TQ330.4⁺6; TQ336.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2020)08-0625-04

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2020.08.0625



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

在汽车行驶过程中, 轮胎易产生疲劳破坏和热破坏^[1]。在轮胎成型过程中, 模具排气性能^[2-3]及辅鼓直径(D')均会对轮胎耐久性能产生影响。实际生产中, 通过调整 D' 以调节胎体和带束层的伸张和变形, 可以改善轮胎耐久性能。P. R. Willett^[4]将热电偶埋在轮胎中测温, 运用有限元分析法详细研究轮胎温度场, 然后根据试验数据推导出轮胎温度场的数学经验模型。H. C. Park^[5]研究了高速行驶汽车轮胎在与地面接触时产生的滞后损耗热量, 并通过数学经验方法研究了轮胎温度场的分布及轮胎滚动过程中胶料粘性损耗对轮胎温度场的影响。H. Kaga等^[6]应用转鼓试验法, 探究了转鼓半径与轮胎结构能量密度之间的数学关系。但轮胎作为多层帘布的复合结构, 其受力复杂, 尚无能够模拟轮胎所有性能的方法, 尤其未有分析 D' 变化对轮胎耐久性能影响的方法。

本工作使用Abaqus软件, 对275/65R17轮胎进行有限元分析, 研究成型过程中 D' 变化对轮胎耐久性能的影响。

1 D' 及相关参数计算

D' 是轮胎成型过程中确定带束层长度的辅鼓尺寸参数, 如图1所示。

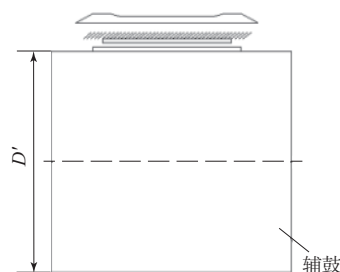


图1 D' 示意

D' 也是轮胎成型工艺中的重要参数, 其对轮胎胶料用量、胎坯周长和成品轮胎质量均产生显著影响。在轮胎的有限元软件分析中, D' 变化只会引起带束层角度发生改变; 而在实际轮胎成型中, D' 变化不仅会直接影响带束层拉伸率(α), 而且还影响带束层角度、带束层拉伸后密度(γ)、胎体拉伸率(β)和冠带层拉伸率(γ)等。作为施工参数考虑, 当 D' 变化时, α , γ , β 和 γ 均相应变化, 其关系如下。

(1) D' 计算公式为

$$D' = \frac{D - 2h}{\alpha + 1} \quad (1)$$

式中: D 为轮胎外直径, 为789 mm; h 为轮胎轮廓断面最高点 to 邻近带束层下表面的距离, 为18.4 mm。

(2) γ 计算公式为

$$\gamma = \frac{x}{\alpha + 1} \quad (2)$$

作者简介: 胡海明(1964—), 男, 山东临沂人, 青岛科技大学教授, 硕士, 主要从事轮胎模具设计与制造的研究工作。

*通信联系人(1442530572@qq.com)

式中, x 为带束层拉伸前密度,为 $0.9\text{根}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。

(3) γ 计算公式为

$$\gamma = \frac{D_0 - (D' + 2h)}{D' + 2h} \tag{3}$$

式中: D_0 冠带层下表面直径,为 757 mm ; h 为带束层厚度,为 2.4 mm 。

2 轮胎有限元模型的建立与参数分析

2.1 建模与验模

通过对轮胎各部位胶料进行单轴拉伸试验获取应力应变数据,选择Yeoh模型对曲线拟合得到各部位胶料的本构参数,选用加强筋模型Rebar单元模拟帘线复合材料。橡胶基体采用C3D8H单元,帘线骨架材料选用SFM3D4R单元。根据材料分布图建立轮胎二维对称轴模型,设置胎圈与轮辋接触,摩擦因数为 0.75 。在二维模型基础上,解析三维模型,将轮辋和路面简化为解析刚体,摩擦因数设置为 0.85 。轮胎有限元模型如图2所示。

本工作轮胎三维模型为增强型,在标准充气压力(290 kPa)的充气工况及标准负荷($1\,360\text{ kg}$)的静态接地工况下,对比接地面积的模拟值与实

测值,发现其误差较大(超出 4.44%),这是因为在对轮胎进行三维有限元建模时,为简化模型忽略了胎面花纹的影响;其余相关性能的模拟值与实测值相差较小,在可接受范围内。同时,使用轮胎五刚试验机在充气压力为 250 和 290 kPa ,负荷为 $680,1\,088$ 和 $1\,360\text{ kg}$ 时,对轮胎侧向与纵向刚度进行测试,发现轮胎侧向刚度与纵向刚度在工程误差范围内,符合精度要求。

2.2 D' 及相关参数变化对轮胎应力的影响

取 D' 及相关参数(如表1所示),使用Abaqus软件对轮胎进行仿真试验,在充气压力为 290 kPa 、负荷为 $1\,360\text{ kg}$ 、速度为 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 下达到稳态时,5个 D' 对应轮胎的冠中、胎肩、胎侧和胎圈的平均应力(简称应力)见图3。

表1 D' 及相关参数

D'/mm	$\alpha/\%$	$y/(\text{根}\cdot\text{mm}^{-1})$	$\beta/\%$	$\gamma/\%$
731.00	2.9	0.874 64	1.7	2.9
728.87	3.2	0.872 09	2.3	3.2
726.76	3.5	0.869 57	2.5	3.4
724.66	3.8	0.867 05	2.7	3.7
722.57	4.1	0.864 55	2.9	4.0

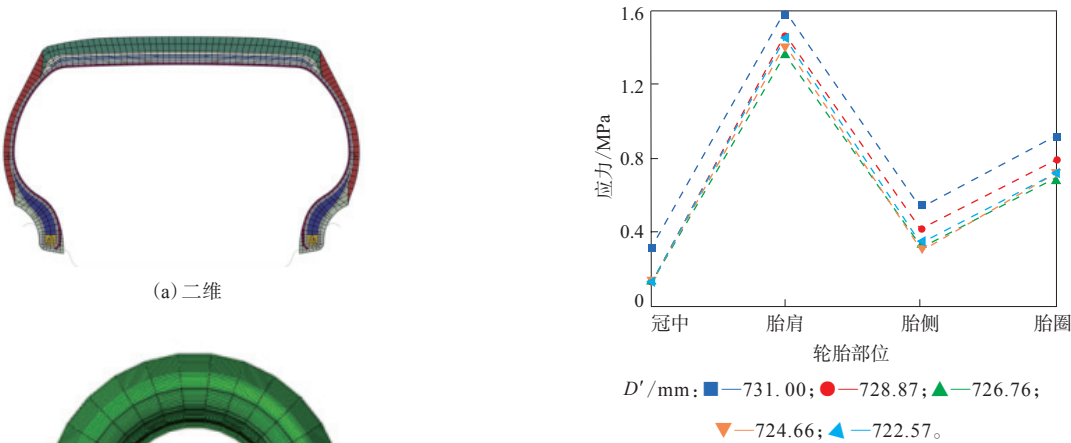


图3 不同 D' 下轮胎各部位的应力

从图3可以看出:轮胎4个部位的应力先随着 D' 的减小而先明显降低,在 D' 为 726.76 mm 时达到最低值(或接近最低值); D' 继续减小,4个部位的应力呈升高趋势。可知 D' 取 726.76 mm ,对应 α 为 3.5% 、 y 为 $0.869\,57\text{根}\cdot\text{mm}^{-1}$ 、 β 为 2.5% 和 γ 为 3.4% 时,轮胎各部位应力值达到最低值(或接近最

图2 轮胎有限元模型

低值), 轮胎耐久性能最佳。因此, 对应力而言, 275/65R17轮胎成型的 D' 宜取726.76 mm。

3 轮胎温度场模型及参数分析

3.1 建模

使用LFA447激光导热仪测试轮胎各部位胶料导热性能, 确定轮胎各部件胶料热性能材料参数, 得到胶料传热系数; 使用降温扫描-差示扫描量热(DSC)仪得到各胶料比热容; 采用液体静力学原理, 利用天平得到胶料密度。计算每个单元的能量损耗, 再积分可得轮胎总的滞后损耗(E), 公式如下:

$$E = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^6 \sum_{n=1}^N [\pi n V A_n^\sigma A_n^\varepsilon \sin(\varphi_n^\sigma - \varphi_n^\varepsilon + \delta_n)] \quad (4)$$

式中, l 为单元编号, L 为整个轮胎的单元数, m 为应力应变向量数, n 为傅里叶编号的谐波数, N 为整个轮胎的谐波数, V 为体积, σ 为应力, ε 为应变, δ 为滞后角, $A_n = \sqrt{b_n^2 + a_n^2}$ (a_n 和 b_n 为常数), $\varphi_n = \tan^{-1}(b_n/a_n)$ 。

用Matlab编写程序计算生热率; Fortran语言编写程序定义内热源, 如图4所示。

```

1 SUBROUTINE HETVAL(CMNAME,TEMP,TIME,DTIME,STATEV,FLUX,
2   (LAYER,KOPT)
3 C
4 C INCLUDE ABA_PARAM.INC
5 C
6 DIMENSION STATEV(STATEV),COORDS(CKRIG)
7 common(num(500),dp(500))
8 do 10 j=1,1014
9   if(TEMP(1).eq.num(j))then
10    statev(1)=num(j)
11    statev(2)=dp(j)
12    end if
13  continue
14  RETURN
15  END
16
17 SUBROUTINE HETVAL(CMNAME,TEMP,TIME,DTIME,STATEV,FLUX,
18   (LAYER,KOPT)
19 C
20 C INCLUDE ABA_PARAM.INC
21 C
22 DIMENSION STATEV(STATEV),COORDS(CKRIG)
23 common(num(500),dp(500))
24 do 10 j=1,1014
25   if(TEMP(1).eq.num(j))then
26    statev(1)=num(j)
27    statev(2)=dp(j)
28    end if
29  continue
30  RETURN
31  END
32
33 SUBROUTINE HETVAL(CMNAME,TEMP,TIME,DTIME,STATEV,FLUX,
34   (LAYER,KOPT)
35 C
36 C INCLUDE ABA_PARAM.INC
37 C
38 DIMENSION STATEV(STATEV),COORDS(CKRIG)
39 common(num(500),dp(500))
40 do 10 j=1,1014
41   if(TEMP(1).eq.num(j))then
42    statev(1)=num(j)
43    statev(2)=dp(j)
44    end if
45  continue
46  RETURN
47  END
48
49 SUBROUTINE HETVAL(CMNAME,TEMP,TIME,DTIME,STATEV,FLUX,
50   (LAYER,KOPT)
51 C
52 C INCLUDE ABA_PARAM.INC
53 C
54 DIMENSION STATEV(STATEV),COORDS(CKRIG)
55 common(num(500),dp(500))
56 do 10 j=1,1014
57   if(TEMP(1).eq.num(j))then
58    statev(1)=num(j)
59    statev(2)=dp(j)
60    end if
61  continue
62  RETURN
63  END

```

图4 Fortran语言定义内热源

为简化计算, 本工作假设如下。

- (1) 轮胎所用胶料为各向同性。
- (2) 轮胎所用胶料不可压缩, 可忽略材料由于温度变化导致的体积变化。
- (3) 轮胎各部位材料性能不受温度影响且滚动过程中胶料能量损耗全部转化为热量, 汽车行驶时轮胎与路面接触产生的摩擦热比较小, 可以忽略。轮胎滚动一定时间后达到热平衡状态, 视为稳态热传导。
- (4) 轮胎处于稳态滚动状态, 其温度稳态分布, 因此每个截面的温度相同。

根据热力学第一定律, 轮胎非稳态温度场热平衡方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{Q} \quad (5)$$

式中, ρ 为胶料密度, c 为胶料比热容, T 为温度, t 为时间, k_x , k_y 和 k_z 分别为胶料沿 x , y 和 z 轴方向的传热系数, $\dot{Q}$ 为胶料生热率。

经过上述步骤, 将胎腔空气网格与轮胎网格连接起来, 得到具有胎腔空气介质的轮胎热分析模型, 如图5所示。

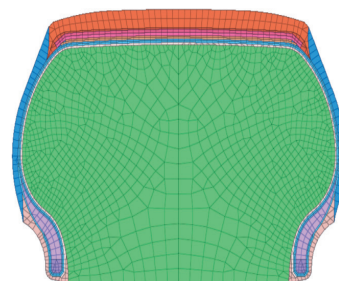


图5 具有胎腔空气介质的轮胎热分析模型

同时可确定轮胎热学边界, 包括胎面边界、胎侧边界、轮辋边界和胎腔边界, 对流换热系数分别为125, 85, 65和134 $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ 。

3.2 验模及参数分析

在环境温度为25 $^{\circ}C$ 、胎压为290 kPa、负荷为1 360 kg、速度为60 $km \cdot h^{-1}$ 条件下, 建立轮胎稳态温度场模型。温度场仿真结果与实测结果对比如图6所示(距离为轮胎横截面上以胎冠中心点为零点的距离)。

从图6可以看出, 轮胎各部位仿真温度与实测温度一致性很高, 胎面与胎肩处温度较高, 胎圈处因损耗因子小、热对流系数大导致温度较低, 仿真结果符合预期。

对5个 D' 轮胎进行仿真, 得冠中、胎肩、胎侧和胎圈处的平均温度(简称温度)分布, 如图7所示。

从图7可以看出: 轮胎各部位温度随着 D' 的减小先降低, 在 D' 为726.76 mm时候达到最低值(或接近最低值); 当 D' 继续减小时, 胎圈与胎肩处的温度较大幅度升高, 可知 D' 为726.76 mm, 对应 α 为3.5%, γ 为0.869 57根 $\cdot mm^{-1}$, β 为2.5%和 γ 为3.4%

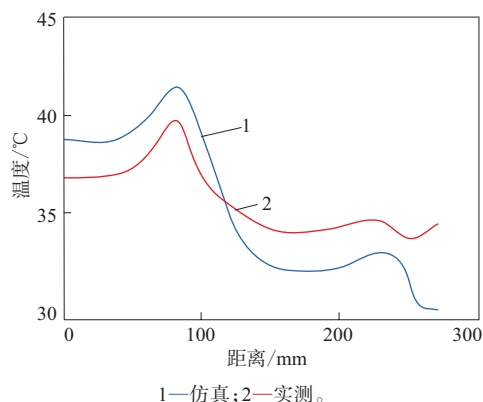


图6 轮胎仿真温度与实测温度对比

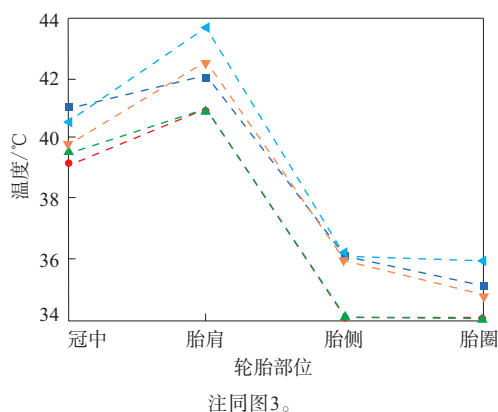


图7 不同 D' 下轮胎各部位温度

时,轮胎整体温度最低,轮胎耐久性能最佳,这说明对于温升而言,275/65R17轮胎成型的 D' 宜设为726.76 mm。

4 结论

(1) 随着 D' 的减小,轮胎各部位应力和温度先降低后升高。在 D' 为726.76 mm时,轮胎各部位应力和温度达到最低值(或接近最低值), D' 继续减小,轮胎各部位应力和温度呈升高趋势。因此,当 D' 为726.76 mm时,轮胎整体应力和温度最低,轮胎耐久性能最佳。

(2) 通过有限元模拟分析,能够优化轮胎成型参数,降低轮胎应力集中和生热,提高轮胎耐久性能,为轮胎生产提供理论指导。

参考文献:

- [1] 熊春明,臧孟炎,周涛,等. 全钢子午线轮胎疲劳破坏现象仿真与优化设计研究[J]. 轮胎工业,2016,36(9):515-519.
- [2] 胡海明,徐永涛,徐方鑫. 弹簧气孔套进气段流场可视化分析[J]. 橡胶工业,2019,66(1):41-45.
- [3] 胡海明,徐永涛,徐方鑫. 无胶须轮胎模具弹簧气孔套进气段结构对喷射流动参数的影响[J]. 橡胶工业,2019,66(3):225-229.
- [4] Willett P R. Heat Generation in Tires due to the Viscoelastic Properties of Elastomeric Components[J]. Rubber Chemistry & Technology, 1974,47(2):363-375.
- [5] Park H C. Analysis of Temperature Distribution in a Rolling Tire due to Strain Energy Dissipation[J]. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 1997,21(21):746-755.
- [6] Kaga H, Okamoto K, Tozawa Y. Stress Analysis of a Tire under Vertical Load by a Finite Element Method[J]. Tire Science & Technology, 1977,5(2):102-118.

收稿日期:2020-02-29

Effect of Diameter of Auxiliary Building Drum on Tire Durability

HU Haiming, WU Kaidi

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Based on Abaqus software, the finite element analysis of 275/65R17 tire was carried out to study the effect of the diameter of auxiliary building drum (D') on the tire durability. The results showed that, when D' changed, the tensile rate of the belt layer, angle of the belt layer, density of the belt layer, tensile rate of the carcass and tensile rate of the crown belt layer all changed. With the decrease of D' , the stress and temperature of each part of the tire first decreased and then increased. When D' was 726.76 mm, the stress and temperature of the whole tire were the lowest, and the tire durability was the best.

Key words: diameter of auxiliary drum; tire; building; durability; finite element analysis