

实心橡胶轮胎非线性粘弹性生热行为和滚动阻力的热力耦合分析

李 昭, 刘 枫, 李凡珠*, 杨海波, 卢咏来, 张立群

(北京化工大学 有机无机复合材料国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 基于非线性粘弹性理论和热力耦合的有限元分析方法研究天然橡胶纳米复合材料制备的实心轮胎的瞬态温升行为和滚动阻力特性。热力耦合分析包含变形分析、热源分析和热传递分析3个相互关联的步骤。变形分析中, 橡胶的超弹性本构方程基于单轴拉伸、平面拉伸和等双轴拉伸试验数据, 采用100阶傅里叶正弦级数精确地分析轮胎滚动一周的应变响应历史数据; 热源分析中, 基于试验数据和自编算法建立热源与加载应变、频率、温度以及加载周次间的函数关系; 热传递分析中, 同样基于试验数据建立橡胶热学参数与温度的关系。采用滚动阻力测试仪验证数值结果, 证实所提出的算法预测轮胎滚动阻力和瞬态温度分布的可靠性。最后基于参数化数值试验研究不同加载位移和转速条件下热导率和损耗因子对轮胎温升和滚动阻力的定量影响。该研究可为高性能轮胎设计提供理论指导和相关分析方法。

关键词: 天然橡胶; 纳米复合材料; 实心橡胶轮胎; 有限元分析; 非线性粘弹性; 滚动阻力; 热力耦合

中图分类号: TQ332; O241.82

文章编号: 1006-8171(2019)07-0390-07

文献标志码: A

DOI: 10.12135/j.issn.1006-8171.2019.07.0390

开发兼具低滚动阻力和高抗湿滑特性的高性能轮胎是一件急迫且有意义的工作。大量学者和工程师通过降低轮胎胎面胶料在指定工况下的滞后因子提高轮胎的燃油效率, 降低滚动阻力和动态温升。然而在滚动过程中由于橡胶材料的粘弹特性导致轮胎内部出现温度上升现象^[1]。温度上升反过来影响轮胎的力学承载能力、操纵稳定性和使用寿命等, 严重的温升甚至导致爆胎等极端情况出现。动态条件下, 橡胶材料力学特性与温度相互影响, 即热力耦合特性。学者在橡胶材料设计中对橡胶基体^[2]、填料分散^[3]、硫化^[4]、界面修饰^[5]和加工工艺^[6]等展开了各项研究工作。

数值仿真方法, 尤其是有限元分析法因研发周期短和成本低在橡胶产品早期设计中得到重视。S. K. Clark^[7]在1976年提出预判轮胎内部温度达到热平衡温度所需时间的精简模型, D. Whicker等^[8]在1981年提出计算轮胎功率损耗的热力耦合分析方法, T. G. Ebbott等^[9]在1999年基

于S. Futamura^[10]提出的变形指数通过非迭代计算方法得到了充气轮胎稳态温度分布, 大大简化了基于完全耦合的迭代算法计算动态温升的方法。J. R. Cho等^[11]预测了三维花纹轮胎的温度分布、滚动阻力及轮胎各部件对整体功率损耗的贡献率。上述工作对轮胎动态温升和滚动阻力的预测提供了理论基础, 但对材料静态和动态力学性能及热学性能的准确测试、非线性粘弹性本构方程的建立、橡胶材料的蠕变效应和动态应力软化效应等的研究报道很少。

本工作以炭黑填充天然橡胶(NR)材料制作的实心轮胎(以下简称实心轮胎)为分析对象, 基于非线性粘弹性理论和热力耦合的有限元分析方法研究实心轮胎的瞬态温升行为和滚动阻力特性, 并基于参数化数值试验研究不同加载位移和转速条件下热导率和损耗因子($\tan\delta$)对轮胎温升和滚动阻力的定量影响^[12-13], 以为高性能轮胎设计提供理论指导和相关分析方法。

1 实验

1.1 NR纳米复合材料的制备

基于指定配方, 首先将NR生胶和炭黑加入密

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目

作者简介: 李昭(1981—), 男, 河南焦作人, 北京化工大学在读博士, 主要从事轮胎制品设计和仿真分析等方面的研究。

*通信联系人(lifanzhu2013@163.com)

炼机中,参考密炼机的转矩曲线和温度适时依次加入氧化锌、硬脂酸和防老剂等助剂,待填料和助剂在NR基体中分散均匀后排胶,然后在开炼机上加硫黄和促进剂混炼,各组分均匀分散后下片。停放一定时间后使用盘式硫化测试仪获取混炼胶的硫化曲线,得到正硫化时间(t_{90})。然后参考 t_{90} ,经平板硫化机硫化得到厚度为1~2 mm的硫化胶片,经专用裁刀冲压制备出用于各项力学和热学性能测试的橡胶试样。

1.2 实心轮胎的制备

实心轮胎由金属轮辋和橡胶层两部分组成,见图1。轮胎直径为102 mm,橡胶层宽度和厚度分别为18和20 mm。制备过程中,首先将金属轮辋的外部粗糙表面使用辊式砂轮打磨平滑,并依次涂上底漆和面漆,操作中需保证涂抹的漆面不受污染,然后将混炼胶与外表面涂漆的轮辋同时放入已预热的硫化模具中,硫化得到测试滚动阻力所用的实心轮胎。

硫化条件为143 °C/15 MPa $\times t_{90}$ 。

1.3 实心轮胎动态温升和滚动阻力的测试

采用北京万汇一方科技发展有限公司生产的RSS-II型橡胶材料滚动阻力测试仪测试实心轮胎在不同加载位移和转速条件下的滚动阻力和表面温升曲线。加载位移分别为3.0和4.3 mm(分别对应约30和50 kg),转速分别为600,800,1 000和1 200 r $\cdot$ min⁻¹。测试的环境温度为25 °C。

2 瞬态温升和滚动阻力热力耦合分析流程

橡胶材料由于内部各组分之间的内摩擦出现

粘弹性特征响应。动态激振条件下部分外部加载功转变为热,从而出现滞后温升行为。对于正弦动态加载条件,单位体积下的能量耗散值^[1],即滞后能密度(H)可根据下式计算。

$$H = \int_0^{2\pi/\omega} \tau(t) \frac{d\gamma(t)}{dt} dt = \pi \gamma_a^2 G'' \quad (1)$$

式中, ω 为角频率, τ 为剪切应力, t 为时间, γ 为应变, γ_a 为峰值应变, G'' 为损耗模量。

实心轮胎的滞后温升和滚动阻力分析过程复杂,主要表现在以下3个方面。

(1) 轮胎在一个滚动周期内每个材料点的应变加载历史呈现非正弦特征的复杂信号。因此需要傅里叶级数对应变幅值加载历史进行拟合。本研究选用傅里叶正弦级数拟合轮胎滚动周期内的应变幅值加载历史。

$$\gamma(\theta) = \sum_{k=1}^N \gamma_{ak} \sin \frac{k\theta}{2} \quad (2)$$

式中, θ 为轮胎滚动中的周向角,取值范围为0~2 π , γ_{ak} 为傅里叶级数中的应变幅值系数, N 为傅里叶正弦级数的阶数。

由式(1)可知非正弦波加载条件下的滞后能密度的表达式为

$$H = \frac{\pi}{2} \sum_{k=1}^N k G'' (\gamma_{ak}, T, f) \gamma_{ak}^2 \quad (3)$$

式中, T 和 f 分别为温度和频率。

生热速率($\dot{Q}$)的计算如下式:

$$\dot{Q} = Hf \quad (4)$$

(2) 轴对称几何模型因节约计算时间被广泛使用,但在轮胎滞后温升分析中轴对称几何模型不可直接代替三维实心轮胎,因为轮胎在地面滚

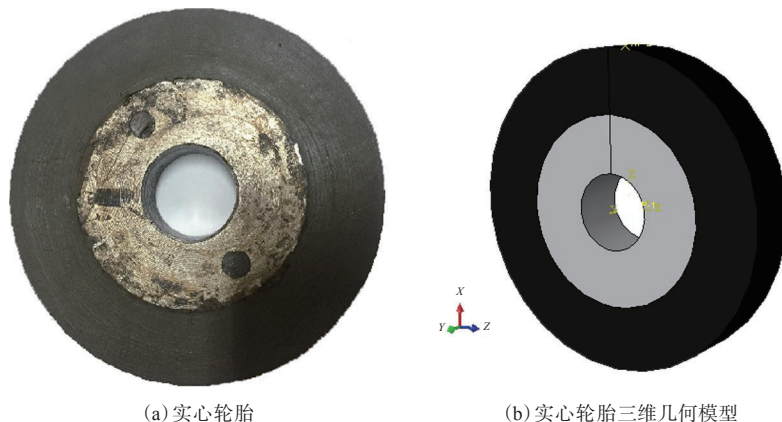


图1 实心轮胎及其三维几何模型

动过程的变形分析中边界加载条件具有非对称性。因此需要提出采用二维轴对称几何模型计算三维实心轮胎滞后温升和滚动阻力的有效方法。

(3) 实心轮胎在滚动过程中,每个材料点对应的变形和温度均有不同,而且采用傅里叶正弦级数拟合加载的应变幅值时,每一阶正弦函数对应的加载频率均有所差别,因此需要建立损耗模量与应变、温度和频率之间的函数关系。对于热导率和比热容等热学参数,需要建立其与温度的依赖关系,以精确地分析实心轮胎的滞后温升和滚动阻力。

计算实心轮胎的滞后温升和滚动阻力需要采用热力耦合分析方法,具体分析流程见图2。

该方法主要分为3个模块^[8]:变形分析、耗散分析和热传递分析。

在变形分析中,通过建立实心轮胎的几何模型、材料的超弹性本构方程和边界条件等操作计算实心轮胎在滚动一周内各个材料点的应变加载历史。因应变幅值加载历史呈现非正弦特征,需要采用傅里叶正弦级数进行精确拟合,从而将非正弦加载转变为多组正弦波加载之和。

在耗散分析中,基于橡胶材料的非线性粘弹性理论,将傅里叶正弦级数拟合得到的应变结果与材料粘弹性测试数据相结合,一方面计算出实心轮胎的滚动阻力,另一方面计算橡胶材料的生热速率,其中将损耗模量与应变、温度和频率建立函数关系。

当每一处材料点的生热速率确定完毕后,在热传递分析中,设定热学参数和热边界条件即可

计算出实心轮胎的温度分布。温度上升反过来影响橡胶材料的粘弹性特征数据,因此需要迭代分析计算出瞬态温度分布。本研究为了简化计算,实心轮胎在恒定转速下承受恒定压缩位移加载,因此不需要建立超弹性本构方程与温度之间的依赖关系。

3 实心轮胎滞后温升和滚动阻力的有限元分析

3.1 变形分析有限元模型的建立

在变形分析中,采用三维几何模型计算实心轮胎每一处材料点对应的应变幅值加载历史。橡胶材料的单元类型选为C3D20RH。金属轮辋和加载路面均采用刚性分析体以节约计算时间。金属轮辋与橡胶轮胎之间完全绑定。轮胎在转动过程中承受来自路面的压缩位移。对于实心轮胎的变形分析采用O_N5超弹性本构方程,由橡胶材料的单轴拉伸、等双轴拉伸和平面拉伸组合测试试验数据拟合而得。

3.2 应变加载幅值的傅里叶正弦级数拟合

从实心轮胎的变形分析中提取轮胎转动一周的每一处材料点的应变幅值,然后采用傅里叶正弦级数对应应变幅值加载历史数据进行拟合。

采用5种不同 N 值的傅里叶正弦级数对靠近胎面处某单元中心点的应变幅值加载历史数据进行拟合,结果如图3所示。

从图3可见,随着 N 增大,拟合精度明显提高。当 N 超过50时,拟合效果较好。100阶傅里叶正弦级数可以完全描述轮胎滚动一周时的应变幅值加载历史数据。因此后续分析中,均选用100阶傅里

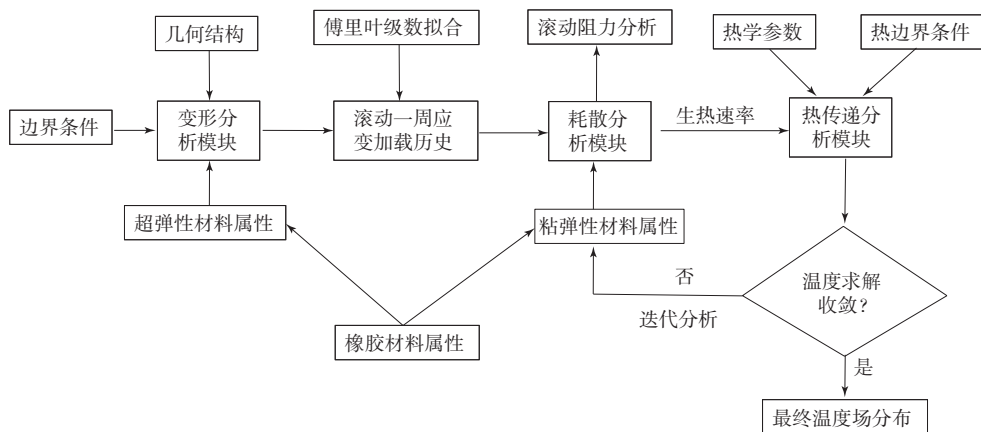


图2 实心轮胎滚动阻力和瞬态温升的热力耦合分析流程

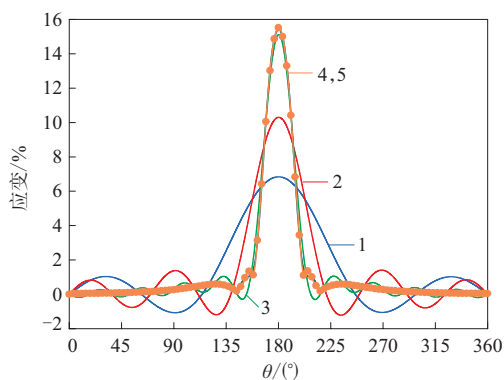


图3 变形分析中提取的应变幅值加载历史及相应采用不同阶数傅里叶正弦级数的拟合结果

图3 变形分析中提取的应变幅值加载历史及相应采用不同阶数傅里叶正弦级数的拟合结果
叶正弦级数拟合应变幅值数据。

3.3 生热速率的确定

由式(3)和(4)可知,在恒定压缩位移加载条件下,生热速率与滞后能密度正相关,而滞后能密度与损耗模量密切相关,损耗模量是应变、温度和频率的函数。同样参考圆柱形橡胶试样的滞后温升分析,采用动态热力学分析仪(DMTA)对硫化胶进行不同温度下的应变扫描,结果如图4所示,温度从高到低曲线相关因数分别为0.999 5, 0.999 5, 0.999 6, 0.999 4, 0.999 1, 0.999 1, 0.999 1, 0.999 3, 0.998 9。

同样采用修正Kraus方程建立特定温度下损耗模量与应变幅值的函数关系,修正Kraus方程如下式:

$$G''(\gamma_a) = G_\infty + \frac{\Delta G'' \gamma_a^m}{1 + (\gamma_a/\gamma_c)^{2m}} + G_2 e^{-\gamma_a/\gamma_2} \quad (5)$$

式中, G_∞ , $\Delta G''$, G_2 , γ_c , γ_2 和 m 均是材料参数。

通过线性插值法建立修正Kraus方程参数与温度的依赖关系。

从图4可知,拟合曲线与试验数据在不同温度和应变条件下均相吻合,且相关因数均约为0.999。损耗模量与频率和加载次数的函数关系的建立方法参考之前的工作^[14]。至此即可建立生热速率与应变幅值、温度、频率和加载次数的依赖关系。

3.4 滚动阻力的计算

滚动阻力(F_R)即为轮胎前进单位距离所耗散的能量,单位是 $J \cdot r^{-1}$ 或 $J \cdot m^{-1}$,在数值上等价于力的单位(N),分析中滚动阻力的单位选为N,其计

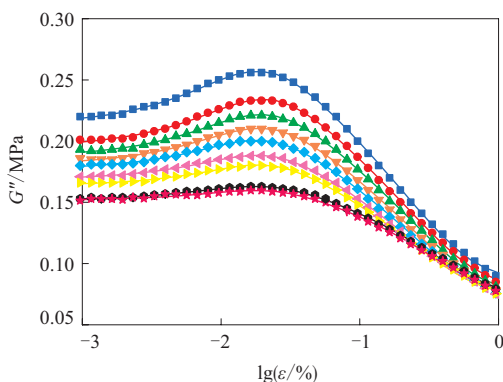


图4 基于修正Kraus方程和线性插值法对不同温度和应变条件下损耗模量的拟合及DMTA的相应测试结果

图4 基于修正Kraus方程和线性插值法对不同温度和应变条件下损耗模量的拟合及DMTA的相应测试结果
算公式如下:

$$H_n = \frac{\pi}{2} \sum_{k_n=1}^{100} k_n G''(\gamma_{ak_n}, T, f) \gamma_{ak_n}^2 \quad (6)$$

$$F_R = \frac{\sum_{n=1}^{N_{el}} H_n V_n}{2\pi r} \quad (7)$$

式中, n 为单元号, H_n 为 n 号单元的滞后能密度, V_n 为 n 号单元的周向体积, r 为实心轮胎的外半径, N_{el} 为总单元号。

4 结果与讨论

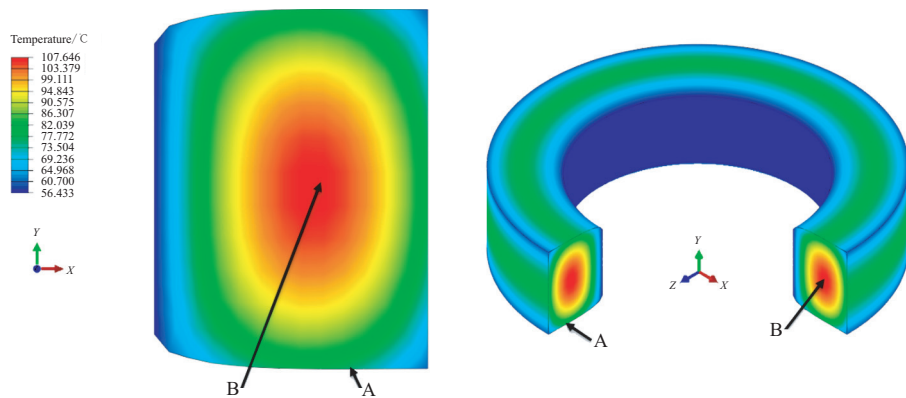
4.1 稳态温度分布云图

压缩位移为3.0 mm、转速为600 $r \cdot \min^{-1}$ 时实心轮胎的稳态温度分布云图如图5所示。

从图5可知,最高温度出现在B处,而其并非处于轮胎中心,更靠近胎面。一方面是因为橡胶材料热导率低,另一方面是因为橡胶轮胎与金属轮辋间的热扩散速率大于胎面与空气之间的热交换速率。最低温度所在位置即为靠近金属轮辋的部位。A处为滚动阻力测试仪记录温度的位置。

4.2 瞬态温升曲线和滚动阻力下降行为

经计算发现,实心轮胎滚动初始阶段温度迅速上升,随后进入平台期,计算和试验结果分别在约1 000和2 000 s时达到稳定,相应的稳态温度分别为74.1和73.9 $^{\circ}C$ 。与温度上升趋势相反,滚动阻力不断下降。滚动阻力的计算结果在1 000 s左右达到稳定,相应的试验结果在此时刻后下降缓慢,逐渐趋于稳定。计算和试验结果对应的稳态



A—滚动阻力测试仪记录温度的位置;B—最高温度所在位置。

图5 实心轮胎的稳态温度分布云图

滚动阻力分别为12.4和12.3 N。无论对于瞬态温度还是滚动阻力,计算结果与试验数据吻合度均较高。

4.3 压缩位移和转速对滞后温升和滚动阻力的影响

不同转速和压缩位移条件下实心轮胎稳态时的温度、滚动阻力和功率损耗(P)结果如表1所示。

表1 不同转速和压缩位移条件下实心轮胎稳态时的温度、滚动阻力和功率损耗结果

项 目	转速 ¹⁾ /($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)				压缩位移 ²⁾ /mm	
	600	800	1 000	1 200	3.0	4.3
稳态温度/ $^{\circ}\text{C}$	74.1	82.9	89.9	96.2	74.1	107.6
滚动阻力/N	12.4	11.8	11.3	11.1	12.4	21.1
功率损耗/W	31.1	39.3	47.0	55.6	31.1	53.1

注:1)压缩位移为3.0 mm;2)转速为600 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

P 的计算公式为

$$P = \sum_n^{N_d} H_n V_n f \quad (8)$$

功率损耗的变化趋势与稳态温度的变化趋势几乎完全相同,这是因为功率损耗的含义与生热速率概念相似,前者是单位时间内的能量损耗量,后者是单位时间单位体积内的能量损耗量。另外需要注意的是,功率损耗描述的对象是整个实心轮胎,而生热速率则是相对实心轮胎中每一个材料点而言。

从表1可以发现:转速为1 200 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 对应的功率损耗为55.6 W,相应的稳态温度为96.2 $^{\circ}\text{C}$,此时的加载条件标记为Case-A;压缩位移为4.3 mm对应的功率损耗是53.1 W,相应的稳态温度

却为107.6 $^{\circ}\text{C}$,此时的加载条件标记为Case-B。Case-A中较高的功率损耗值却出现较低的稳态温度,这是因为尽管Case-B的功率损耗值大,但其转速为600 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$,低于Case-A的1 200 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速;而转速下降使轮胎与空气间的热对流系数降低^[15],即热扩散速率下降,因此Case-B中较低的功率损耗值却出现较高的稳态温度。

5 参数化数值试验

5.1 热导率对实心轮胎表面和芯部稳态温升的影响

压缩位移为3.0 mm、转速为600 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时热导率对实心轮胎表面(A处)和芯部(B处)稳态温升的影响如图6所示。

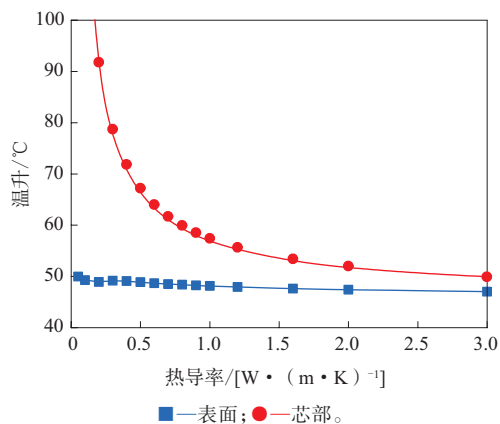


图6 热导率对实心轮胎表面和芯部稳态温升的影响

温升指稳定后的平衡温度与环境温度(25 $^{\circ}\text{C}$)的差值。热导率由0.05 $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 增至3.0 $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$,而其他因素均保持不变。芯部温

升随热导率的提高不断下降,尤其是当热导率由 $0.05 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 增至 $1.0 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 时,下降最为迅速,随后保持相对稳定的状态。表面温升随热导率的提高几乎保持恒定。而芯部温升与表面温升之间的差值随热导率的增大而减小,即橡胶材料高的热导率既有利于降低轮胎内部的最高温度,同时益于轮胎温度的均匀分布。

5.2 滞后因子对实心轮胎表面和芯部稳态温升及滚动阻力的影响

压缩位移为 3.0 mm 、转速为 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时 $\tan\delta$ 对实心轮胎表面和芯部稳态温升及滚动阻力的影响如图7所示。

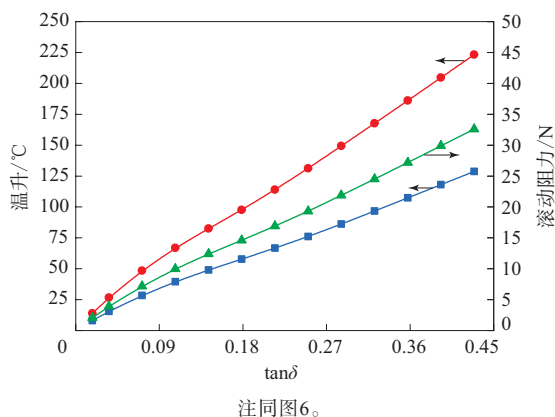


图7 $\tan\delta$ 对实心轮胎表面和芯部稳态温升及滚动阻力的影响

图7中 $\tan\delta$ 是基于实心轮胎有限元模型中单元的体积,将各单元对应的滞后因子平均化处理得到的。 $\tan\delta$ 由0.02增至0.43,而其他因素均保持不变。芯部和表面温升及滚动阻力均与 $\tan\delta$ 呈线性增长关系。 $\tan\delta$ 每增大0.01,芯部和表面温升及滚动阻力分别增大 4.6°C 、 2.5°C 和 0.6 N ,另外随着 $\tan\delta$ 值的增大,整个轮胎的温度分布更加不均匀。从计算中可知,当 $\tan\delta$ 小于0.18时,可将实心轮胎芯部的最高温度控制在 130°C 以内。从图6和7可知,小 $\tan\delta$ 和高热导率的橡胶材料具有自生热低和散热快的特点,适于制备节油安全的高性能轮胎。

6 结论

(1) 基于热力耦合分析法和非线性粘弹性理论编写出可精确预测实心轮胎在不同压缩位移和转速条件下的瞬态温升和滚动阻力的算法;通过

建立轮胎和地面的接触分析提取轮胎滚动一周的主应变结果,100阶傅里叶正弦级数可对应变幅值加载历史数据实现精确拟合;提出采用二维轴对称几何模型预测三维轮胎滚动阻力和瞬态温升分布的有效方法。结果表明,瞬态温度随转速和压缩位移的增大均呈上升趋势,滚动阻力随加载位移增大而增大,却随转速加快而减小。

(2) 采用橡胶材料滚动阻力测试仪验证有限元分析的数值结果,证实了所提出算法预测轮胎滚动阻力和瞬态温度分布的可靠性。

(3) 利用参数化数值试验定量研究热导率对轮胎表面和芯部稳态温升的影响以及 $\tan\delta$ 对表面和芯部稳态温升及滚动阻力的影响。结果表明:热导率越高,芯部温升越低而表面温升变化不大;表面和芯部稳态温升及滚动阻力均随 $\tan\delta$ 呈线性增长趋势。 $\tan\delta$ 每增大0.01,表面和芯部稳态温升及滚动阻力分别增大 2.5°C 、 4.6°C 和 0.6 N 。

参考文献:

- [1] Medalia A I. Heat Generation in Elastomer Compounds: Causes and Effects[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1991, 64 (3): 481-492.
- [2] Yang Z, Liu J, Liao R, et al. Rational Design of Covalent Interfaces for Graphene/Elastomer Nanocomposites[J]. Composites Science and Technology, 2016, 132: 68-75.
- [3] Shen J, Liu J, Gao Y, et al. Elucidating and Tuning the Strain-induced Non-linear Behavior of Polymer Nanocomposites: a Detailed Molecular Dynamics Simulation Study[J]. Soft Matter, 2014, 10 (28): 5099-5113.
- [4] Zaimova D, Bayraktar E, Miskioglu I. Design and Manufacturing of New Elastomeric Composites: Mechanical Properties, Chemical and Physical Analysis[J]. Composites. Part B Eng. 2016, 105: 203-210.
- [5] Ning N, Ji L, Zhang L, et al. High Elasticity and Conductivity of Elastomer Composites with Arrayed Carbon Nanotubes as Nanosprings[J]. Composites Science and Technology, 2015, 118: 78-84.
- [6] Gui Y, Zheng J, Ye X, et al. Preparation and Performance of Silica/SBR Masterbatches with High Silica Loading by Latex Compounding Method[J]. Composites. Part B Eng. , 2016, 85: 130-139.
- [7] Clark S K. Temperature Rise Times in Pneumatic Tires[J]. Tire Science and Technology, 1976, 4 (3): 181-189.
- [8] Whicker D, Browne A L, Segalman D J, et al. A Thermomechanical Approach to Tire Power Loss Modeling[J]. Tire Science and Technology, 1981, 9 (1): 3-18.
- [9] Ebbott T G, Hohman R L, Jeusette J P, et al. Tire Temperature and

- Rolling Resistance Prediction with Finite Element Analysis[J]. Tire Science and Technology, 1999, 27(1): 2-21.
- [10] Futamura S. Deformation Index Concept for Hysteretic Energy Loss Process[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1991, 64(1): 57-64.
- [11] Cho J R, Lee H W, Jeong W B, et al. Numerical Estimation of Rolling Resistance and Temperature Distribution of 3-D Periodic Patterned Tire[J]. Int. J. Solids Struct., 2013, 50(1): 86-96.
- [12] 李凡珠, 刘金朋, 卢咏来, 等. 橡胶材料循环加载的本构行为及数值拟合[J]. 橡胶工业, 2017, 64(2): 79-83.
- [13] 于海富, 李凡珠, 杨海波, 等. 橡胶材料的混合高弹性本构模型研究[J]. 橡胶工业, 2018, 65(5): 509-513.
- [14] Li F, Liu J, Yang H, et al. Numerical Simulation and Experimental Verification of Heat Build-up for Rubber Compounds[J]. Polymer, 2016, 101: 199-207.
- [15] Browne A L, Wickliffe L E. Parametric Study of Convective Heat Transfer Coefficients at the Tire Surface[J]. Tire Science and Technology, 1980, 8(3): 37-67.

收稿日期: 2019-02-03

Thermo-mechanical Coupling Analysis of Heat Build-up and Rolling Resistance due to Nonlinear Viscoelasticity for Solid Rubber Tire

LI Zhao, LIU Feng, LI Fanzhu, YANG Haibo, LU Yonglai, ZHANG Liquan

(Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The transient temperature and rolling resistance of a solid rubber tire made of natural rubber nanocomposite were analyzed based on the thermo-mechanical coupling approach and nonlinear viscoelastic theory by using finite element method. The thermo-mechanical coupling approach could be divided into three major parts: deformation, dissipation, and thermal transfer modules. In the deformation module, uniaxial, planar, and equibiaxial tensile tests were used to determine the hyperelastic constitutive equation. The 100th-order Fourier sine series was used to approximate the strain amplitude. In the dissipation module, the loss modulus was updated as a function of strain amplitude, temperature and frequency. In the thermal transfer module, the dependence of thermal parameters on temperature was established. A rolling resistance tester was also used to verify the numerical results, which revealed that the proposed analytical method was a reliable approach to predict rolling resistance and transient temperature distribution for tires. At last, the dependence of rolling resistance and heat build-up on thermal conductivity and loss factor was investigated quantitatively by the parametric numerical experiments. The work could provide theoretical guidance and relevant analysis methods for the design of high performance tire.

Key words: natural rubber; nanocomposite; solid rubber tire; finite element analysis; nonlinear viscoelasticity; rolling resistance; thermo-mechanical coupling

住友橡胶营业利润锐减

住友橡胶发布财报数据,由于多重不利因素,该公司2019年第1季度销售额为2 112.83亿日元,同比降低0.6%;营业利润为59.87亿日元,同比降低57.3%;净利润为28.55亿日元,同比大降62.8%。

公司主力轮胎业务销售额为1 817.21亿日元,同比降低0.2%;营业利润为42.9亿日元,同比降低62.5%。住友橡胶指出,国内轮胎市场方面,以邓禄普品牌为中心的低耗油轮胎等高附加值产品的销售行情看好。海外轮胎市场方面,受中国经济

增速减缓的影响,产品销售数量有所减小,但是在以欧洲为中心的市场销售势头良好。轮胎销售没有明显减少,在各项业务总体销售额超过上年同期的情况下,受原材料价格上涨以及固定费用等生产成本增加,营业利润骤减。其他业务方面,体育用品业务销售额为201.65亿日元,同比降低2.9%;营业利润为8.57亿日元,同比降低52.0%。其他产品业务销售额为93.97亿日元,同比降低11.5%;营业利润为5.28亿日元,同比降低48.7%。

(摘自《中国化工报》,2019-05-30)