

轮胎充气压力损失仿真研究

朱昕宇¹, 李畅达², 梁晨¹, 王国林¹

(1. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 埃克森美孚亚太研发有限公司 上海技术中心, 上海 200241)

摘要: 考虑轮胎各层结构不同胶料的透气性差异和瞬态气体扩散过程, 建立更准确的有限元模型仿真轮胎充气压力损失过程, 预测轮胎的充气压力损失率。结果表明, 轮胎充气压力损失的预测结果与试验结果的误差在10%以内, 说明所建立的有限元模型能够较准确地仿真轮胎的充气压力损失过程。该研究可为进一步优化轮胎气密性设计及研究轮胎老化提供理论基础。

关键词: 轮胎; 充气压力损失率; 气体扩散; 有限元仿真

中图分类号: TQ336.1; O241.82

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2019)08-0606-05

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2019.08.0606

轮胎充气压力损失的主要原因是内部气体通过扩散作用透过各结构胶层^[1]。轮胎的充气压力保持性能十分重要, 低充气压力损失率的轮胎节省燃油, 减少二氧化碳排放。目前我国轮胎的充气压力损失率高于世界平均水平^[2], 但对轮胎充气压力保持性能的研究鲜有报道。有试验^[3]表明较低的充气压力损失率可以提高轮胎的耐久性能。现在通过试验方法测定轮胎的充气压力损失率需要数月, 周期长、成本高^[4]。尽管已有包含轮胎参数的充气压力损失率预测公式^[5], 但是由于推导过程中对轮胎模型进行了过多简化, 其预测结果并不理想。在轮胎老化研究中, 国外已经初步完成了轮胎中气体扩散的仿真^[6], 但是其模型并未考虑不同气体在不同胶层中透过能力的差异。

本研究考虑轮胎各层结构胶料的透气性差异和瞬态气体扩散过程, 建立更准确的有限元模型^[7-9], 仿真轮胎充气压力损失过程, 预测轮胎的充气压力损失率。

1 轮胎充气压力损失率试验

本研究选择某公司的一款轿车子午线轮胎为研究对象建立有限元模型, 通过模型预测与试

验测定的轮胎充气压力损失率对比说明仿真方法的有效性。轮胎充气压力损失率的测定于上海埃克森美孚亚太研发中心充气压力损失率试验室进行, 共测定4个轮胎样本的充气压力损失率。

首先, 将轮胎充气(空气)至343 kPa(绝对压力), 并检查轮胎-轮辋区域的密封性。然后, 将轮胎样本置于恒温[(21±1)℃]测试室内, 通过安装在轮胎上的压力传感器记录轮胎的充气压力数值, 如图1所示。



图1 轮胎充气压力损失率测定设备

每天读取4次轮胎充气压力数值, 共记录42天的试验数据。根据下式对读取的充气压力数值进行标准化处理:

$$p_N = (p_1 + b_1) (T_2/T_1) - b_2 \quad (1)$$

式中, p_N 为轮胎标准充气压力, p_1 为轮胎充气压力测量值, b_1 为大气压测量值, b_2 为标准大气压, T_1 为测量室温, T_2 为标准室温。

对获取的充气压力数据采用下式拟合轮胎充气压力损失曲线:

$$p = p_0 e^{\beta t} \quad (2)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675240)

作者简介: 朱昕宇(1993—), 男, 浙江诸暨人, 江苏大学在读硕士研究生, 主要从事现代汽车轮胎技术的研究。

E-mail: zhu_xinyu@foxmail.com

式中, p 为轮胎充气压力, p_0 为轮胎初始充气压力, β 为轮胎每天充气压力损失率, t 为时间。

对于轿车子午线轮胎, 一般认为在第14天时胎内气体扩散达到稳态, 因此使用后28天的数据进行拟合。然后采用ASTM F 1112—2010《静态测试无内胎轮胎的充气压力损耗率》推荐的公式计算得到轮胎每月的充气压力损失率(R)^[10]:

$$R=3\ 000\beta \quad (3)$$

4个轿车子午线轮胎样本(编号为轮胎1—4)的 R 测定结果分别为1.97%, 1.99%, 2.02%和2.17%, 平均值为2.04%。

2 胶料的透气性试验

轮胎各层结构胶料的渗气性存在较大差异, 但以前的研究并未严格区分胶料种类, 只是将胶料划分为天然橡胶类和丁基橡胶类。为了得到准确的轮胎充气压力损失率, 本研究测定了氮气和氧气在轿车子午线轮胎大部分胶料中的扩散系数和溶解系数。

采用Labthink VAC-V2型气体渗透测试仪, 根据国家标准^[11]采用压差法测定胶料的透气性参数。压差法测试原理如图2所示, 胶片试样如图3所示。

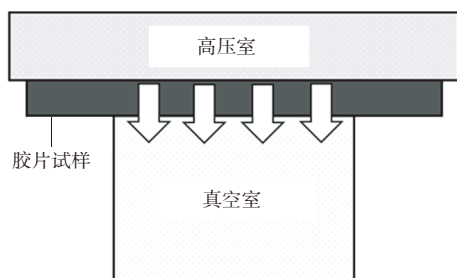


图2 压差法测试原理

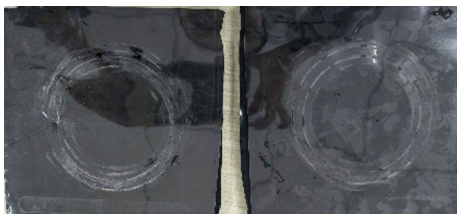


图3 胶片试样

将试样放置在气体渗透测试仪上下腔之间夹紧, 然后对真空室进行真空处理, 排尽试样中已溶解的气体。当达到规定的真空度后, 向高压室充

入1个大气压的测试气体, 并保证在试样两侧形成恒定的压差。这样气体会在浓度梯度的作用下由高压侧向低压侧渗透。根据真空室内的压力变化即可推算出测试气体在该试样中的扩散系数和溶解系数。氮气和氧气在各种胶料中的透过性试验结果如表1和2所示。

表1 氮气透过性试验结果

胶料	扩散系数 $\times 10^{11} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	溶解系数 $\times 10^7 / [\text{mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{Pa})^{-1}]$
耐磨层	10.571	3.689
过渡层	6.385	3.418
内衬层	1.277	1.075
胎侧	12.213	3.076
胎面	3.889	3.702

表2 氧气透过性试验结果

胶料	扩散系数 $\times 10^{11} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	溶解系数 $\times 10^7 / [\text{mol} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{Pa})^{-1}]$
耐磨层	13.912	7.204
过渡层	7.567	7.419
内衬层	1.433	6.028
胎侧	20.512	6.728
胎面	4.571	8.900

3 轮胎充气压力损失仿真方法

3.1 控制方程

基于ABAQUS软件的Mass Diffusion (MD) 模块仿真由于浓度梯度出现气体扩散现象。MD模块中的控制方程为基于Fick定律的各种扩展式。采用Fick定律来描述物质的传递已经得到了广泛的应用^[12]。扩散物质稳态扩散下的Fick方程为

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (4)$$

式中, J 为扩散通量, D 为扩散系数, c 为浓度, $\partial c / \partial x$ 为浓度梯度。

扩散物质在介质中的浓度分布随时间发生变化的扩散称为非稳态扩散, 其扩散通量随着位置与时间而变化。基于Fick第一定律推导出的Fick第二定律描述了非稳态扩散的规律, 其表达式为

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (5)$$

扩散物质在扩散过程中应满足质量守恒定律:

$$\int_V \frac{\partial c}{\partial t} dV + \int_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{J} dS = 0 \quad (6)$$

式中, V 为扩散介质的体积, S 为有效扩散发生的面

积, n 为表面的外法线, $n \cdot J$ 表示离开扩散表面的扩散通量。

在 ABAQUS 软件中网格节点的基本变量是归一化浓度 (φ), 定义为

$$\varphi = c/s \quad (7)$$

式中, s 为溶解度。

当扩散相为气体时, 根据 Sievert 定律有:

$$c = sp_i \quad (8)$$

式中, p_i 为气体分压。

结合 Sievert 定律和 φ 的定义, 可以得到

$$\varphi = c/s = p_i \quad (9)$$

将式 (7) 代入式 (4), 可得到变量为 φ 的 Fick 方程:

$$J = -D \left(s \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \varphi \frac{\partial s}{\partial x} \right) \quad (10)$$

在 ABAQUS 软件中这样处理的目的是当不同材料的网格之间存在公共节点时, 以 φ 作为变量可以保证其在不同材料的边界上是连续的。将式 (10) 代入式 (6) 即可得到 ABAQUS 软件中基于 Fick 定律的控制方程。

3.2 轮胎充气压力损失有限元模型建立

3.2.1 有限元模型

试验^[13]结果表明, 轮胎的充气压力损失率与轮胎尺寸有关。为了获得较好的预测精度, 从进行充气压力损失率试验的轮胎上切割断面, 进行逆向建模得到轮胎有限元模型。并对其进行充气仿真, 得到充气后的轮胎轮廓, 该方法的有效性已得到验证^[14]。为了实现气体的瞬态扩散仿真, 在轮胎有限元模型的基础上, 在轮胎内部建立空气腔单元, 得到如图4所示的有限元模型用以后续充气压力损失的仿真。

该模型共有 23 948 个节点、23 918 个单元, 单元类型采用 DCAX4。

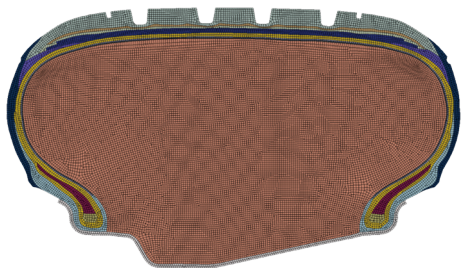


图4 带有空气腔的轮胎充气压力损失仿真有限元模型

3.2.2 材料参数

应用 MD 模块进行质量扩散计算, 需要确定各组分对扩散相的扩散系数和溶解系数。对于一般胶料, 其透气性参数由试验测定 (测定结果见表1和2)。

由于制造工艺和帘线结构等因素, 轮胎中钢丝帘线内部分布着众多未被橡胶填满的空隙, 这意味着气体沿帘线方向具有更快的扩散速度, 为其他方向的 30~200 倍^[15]。根据文献[16], 基于测得的氮气和氧气在胎体层和带束层胶料内的扩散系数, 将其扩大 200 倍作为气体在胎体层和带束层帘线-橡胶复合材料内的扩散系数。

3.2.3 边界条件

本研究中大气和轮胎气腔中的气体均视为理想气体, 因此根据式 (9), 可将 p_i 作为边界条件, 故可应用道尔顿分压定律分别计算氮气和氧气在轮胎内外的分压。

假设空气由 21% 的氧气和 79% 的氮气组成, 则空气中氧气分压约为 21 kPa, 氮气分压约为 79 kPa。R 测试中轮胎充气压力为 343 kPa, 因此仿真中设定轮胎空气腔内的氧气分压为 72.03 kPa, 氮气分压为 270.97 kPa。

4 结果与讨论

根据上述仿真方法对轿车子午线轮胎进行充气压力损失仿真, 得到充气 42 天后轮胎内的氧气和氮气归一化浓度分布, 如图5和6所示。

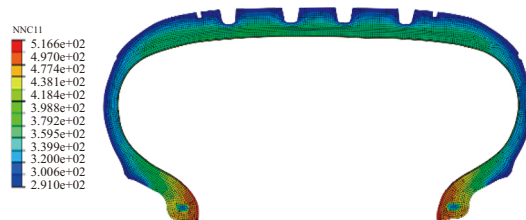


图5 充气第42天轮胎内氮气的归一化浓度分布

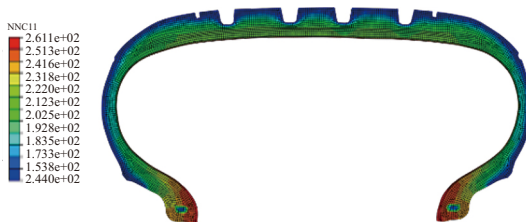


图6 充气第42天轮胎内氧气的归一化浓度分布

根据仿真结果显示,充气42天后轮胎气腔内的氮气分压为267 kPa,氧气分压为68 kPa。输出1~42天内氮气与氧气的分压仿真结果后,根据下式即可得到轮胎充气压力随时间的变化曲线。

$$p = p_{N_2} + p_{O_2} - p_{N_{atm}} \quad (11)$$

式中, p_{N_2} 和 p_{O_2} 为轮胎气腔内的氮气分压和氧气分压, $p_{N_{atm}}$ 为大气压力。

根据有限元模型预测得到的 R 值为1.91%,轮胎1—4的 R 测试平均值为2.04%,预测结果与试验结果的误差在10%以内。

4个轮胎样本的试验数据与仿真结果如图7所示,图中试验数据的波动可能是由于试验室温度波动引起的。

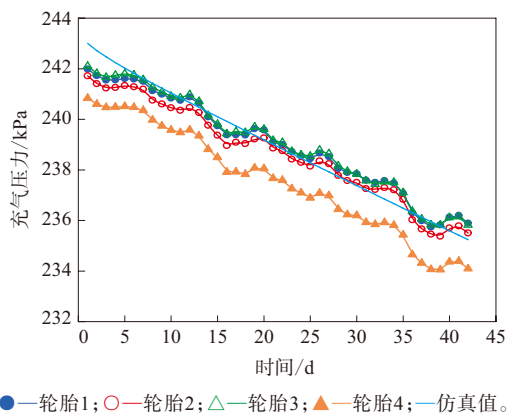


图7 轮胎充气压力变化试验与有限元仿真结果

仿真结果相对试验结果偏小的原因可能是由于根据文献对橡胶-帘线复合材料的扩散系数放大倍数取值较小所致,同时轮辋与轮胎接触处可能存在少量气体泄漏情况。

综上可知,本研究建立的有限元模型能较准确地描述轮胎的充气压力损失过程,并准确地预测轮胎的充气压力损失率。

5 结论

本研究建立了一种有限元模型来仿真由于气体扩散而导致的轮胎充气压力损失过程,从而预测轮胎的充气压力损失率。

采用压差法测试了氧气和氮气在各种轮胎胶料中的扩散系数和溶解系数;通过建立轮胎内部的空气腔单元实现瞬态气体损失仿真。本研究对轮胎充气压力损失率的预测结果与试验结果的误

差在10%以内,说明所建立的有限元模型能够较准确地仿真轮胎的充气压力损失过程,较准确地预测轮胎的充气压力损失率。同时,该研究为进一步优化轮胎气密性设计及研究轮胎老化提供了理论基础。

参考文献:

- [1] Van Amerongen G J. Diffusion in Elastomers [J]. Rubber Chemistry and Technology, 1964, 37 (5): 1065-1152.
- [2] Waddell D W H. Effect of Inflation Pressure Loss Rates on Tire Rolling Resistance, Vehicle Fuel Economy, and CO₂ Emissions of Asia-Pacific and China [J]. 中国橡胶, 2011, 27 (20): 7-17.
- [3] Gillen K T, Wise J, Jones G D, et al. Final Report on Reliability and Lifetime Prediction[R]. Akron: Goodyear Tire and Rubber Company, 2012.
- [4] Martens J E, Terrill E R, Napier R C, et al. Effect of Measurement Frequency and Test Duration on the Inflation Pressure Loss Rate of Radial Medium Truck Tires [J]. Tire Science And Technology, 2015, 43 (4): 325-337.
- [5] Costemalle B. Tire Pressure Loss and Intracarcass Pressure Modeling [J]. Tire Science and Technology, 1992, 20 (4): 200-211.
- [6] 张建, 王国林, 秦文龙, 等. 橡胶材料参数对轮胎硫化特性的影响 [J]. 橡胶工业, 2017, 64 (1): 9-13.
- [7] 王国林, 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.
- [8] 王国林, 徐海青, 梁晨, 等. 轮胎胶料热物性参数对温度场的影响研究 [J]. 橡胶工业, 2017, 64 (7): 435-440.
- [9] Ellwood K R, Baldwin J, Bauer D R. A Finite Element Model for Oven Aged Tires [J]. Tire Science and Technology, 2005, 33 (2): 103-119.
- [10] ASTM F1112—2006, Standard Test Method for Static Testing of Tubeless Pneumatic Tires for Rate of Loss of Inflation Pressure[S].
- [11] GB/T 7755. 1—2018, 硫化橡胶或热塑性橡胶 透气性的测定 第1部分. 压差法[S].
- [12] Crank J. The Mathematics of Diffusion[M]. London: Oxford University Press, 1979.
- [13] Coddington D M. Inflation Pressure Loss in Tubeless Tires—Effects of Tire Size, Service, and Construction [J]. Rubber Chemistry and Technology, 1979, 52 (5): 905-919.
- [14] 梁晨. 子午线轮胎综合接地性能评价体系与方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
- [15] Uzina R, Basin V. Gas Permeability of Rubber Cord Systems [J]. Kauchuk i Rezina, 1958, 17 (11): 126-137.
- [16] Kerchman V. Gas Transport in the Tire Aging Test and Intracarcass Pressure Issues [J]. Tire Science and Technology, 2011, 39 (2): 95-124.

收稿日期: 2019-02-19

Simulation on Tire Inflation Pressure Loss

ZHU Xinyu¹, LI Changda², LIANG Chen¹, WANG Guolin¹

(1. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Shanghai Technology Center, ExxonMobil Asia Pacific Research & Development Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: By considering the gas permeability difference and the transient gas diffusion process of tire structural compounds, a more accurate finite element model was established to simulate the tire inflation pressure loss process, and predict the tire inflation pressure loss rate (IPLR). The results showed that the difference between the simulation value and test value of the tire IPLR was within 10%, which indicated the finite element model could accurately describe the tire inflation pressure loss process. This work provided reference to the further design of air tightness of tire and research on tire aging.

Key words: tire; IPLR; gas diffusion; finite element simulation

固特异R14农业轮胎为Kubota小型拖拉机提供解决方案 美国《现代轮胎经销商》(www.moderntiredealer.com)2019年5月14日报道:

Kubota拖拉机公司选择了一家轮胎制造商——蒂坦国际公司来生产Kubota小型拖拉机的独家配套产品。

固特异R14交叉型轮胎(如图1所示)是为Kubota小型拖拉机选定的独家配套轮胎。该业务还延伸到了Kubota的加拿大子公司——Kubota加拿大有限责任公司。



图1 固特异R14农业轮胎

“市场上绝大多数的小型拖拉机都配备工业胎面(R-4)轮胎,但其在牵引性能方面存在不足。如果使用农业胎面(R-1)轮胎,会有更大的牵

引力,但在坚硬的路面行驶振动更大。到目前为止,还没有一种轮胎适应小型拖拉机轮胎多功能化。”Kubota小型拖拉机产品经理Jacob Sherman说,“在测试了R14轮胎之后,我们知道它在各种雪地、田地、院坝以及在装载机和牧场应用方面的性能与客户对我们产品的期望相当。相信固特异R14轮胎是我们的经销商与客户关系的改变者,它是使Kubota在竞争中脱颖而出的一个重要因素。”

Kubota对固特异R14轮胎进行了详细的测试,蒂坦也表示该轮胎采用了独特的新型混合胎面设计,结合了R-1、草地胎面(R-3)和R-4的元素。Kubota认为,综合这种混合型轮胎的打滑和振动测试结果,轮胎行业需要转产这种轮胎。

虽然包含在合同里的BX和B系列Kubota车型仍有同规格的R-1,R-3和R-4轮胎作为选择,但Sherman预计“我们的大多数客户将转向使用固特异R14轮胎。”

蒂坦和固特异农业轮胎公司的产品经理Scott Sloan称:“小型和超小型汽车市场轮胎的多功能性远未满足需求。”

除了为Kubota提供原配轮胎外,固特异R14轮胎产品线已扩大到18个用于替换市场的规格——包括标准轮胎和低胎侧轮胎,用于功率最大为110 kW(150马力)的小型拖拉机。

(和 燕摘译 吴秀兰校)