

基于LS-DYNA的爆胎历程轮胎刚度特性仿真研究

蔡永周¹, 曾繁林¹, 欧阳俊¹, 臧孟炎²

(1. 广州汽车集团股份有限公司 汽车工程研究院, 广东 广州 511434; 2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 基于LS-DYNA非线性有限元分析软件, 采用壳单元模型模拟橡胶-帘线复合材料, 建立215/60R16子午线轮胎有限元模型, 并以不同充气压力模拟爆胎历程, 分析不同充气压力下轮胎在垂向载荷、侧向载荷和纵向载荷作用下的变形。结果表明, 轮胎刚度随充气压力降低而急剧下降, 轮胎发生爆破后垂向刚度、侧向刚度和纵向刚度分别降到正常充气压力下的约30%、38%和40%。本研究获得的不同充气压力下轮胎三向刚度变化特性为爆胎车辆的动力学响应和操纵稳定性分析提供依据。

关键词: 轮胎; 爆胎历程; 刚度特性; 充气压力; 有限元分析

中图分类号: TQ336.1⁺1; O241.82

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2019)06-0461-05

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2019.06.0461

轮胎作为路面与车辆间唯一接触的部件, 其对车辆行驶安全的影响深受社会公众和汽车业界的关注。爆胎, 尤其是高速公路上高速行驶的车辆爆胎是重大交通事故的罪魁祸首之一。在我国高速公路上, 爆胎引起的重大交通事故约占重大交通事故的70%, 在美国则高达80%。这些严重后果促使人们对高速行驶车辆爆胎十分重视, 也引起相关专家学者等对爆胎事故发生机理及应对策略开展全面研究。从爆胎开始到气压泄完的过程中轮胎三向刚度会急剧改变, 严重影响行驶车辆的动力学响应和操纵稳定性, 因此有必要对行驶车辆爆胎过程的轮胎三向刚度特性变化开展具体研究^[1-3]。

本工作以215/60R16子午线轮胎为例, 采用LS-DYNA非线性有限元分析软件, 进行不同充气压力下轮胎三向刚度特性的研究, 为开展爆胎车辆的动力学响应和操纵稳定性研究奠定基础。

1 不同充气压力下轮胎三向刚度分析

车辆行驶过程中发生爆胎时轮胎气压迅速降低, 直到为零, 轮胎变瘪, 此时轮胎的三向刚度特

性相对于爆胎之前有根本性改变。

作用在轮胎上的载荷与其产生的变形之间的关系称为轮胎的刚度特性。本工作分别对垂向刚度、侧向刚度和纵向刚度在不同充气压力下的特性进行仿真分析, 通过正常充气压力下仿真结果与试验结果的一致性说明仿真方法的正确性。

2 建立轮胎有限元模型

2.1 网格划分

胎面花纹对轮胎静态刚度几乎没有影响^[3], 为方便轮胎模型建立并提高计算效率, 本研究建立的轮胎有限元模型忽略花纹, 直接用无花纹轮胎开展仿真研究。为提高划分网格的质量及控制单元数量, 对轮胎结构做如下简化和修改处理。

(1) 将钢丝束层与胎侧相连处等部位的部分长尖角处理为圆倒角。

(2) 将位置相邻且材料特性相同的翼胶与胎侧合并成一部分。

基于划分好的二维网格模型, 借助大型通用软件Hypermesh生成三维有限元网格模型, 如图1和2所示。

2.2 材料模型选取及参数确定

2.2.1 橡胶材料

普通轮胎主要采用橡胶材料和橡胶-帘线复

作者简介: 蔡永周(1983—), 男, 山东曹县人, 高级工程师, 博士, 从事汽车主被动安全及关键零部件研究。

E-mail: caiyongzhou@gacrnd.com

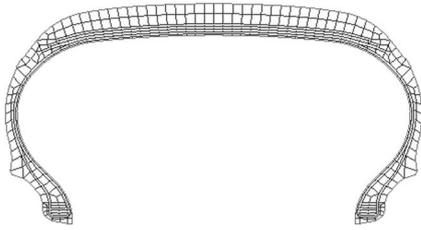


图1 轮胎横截面网格模型

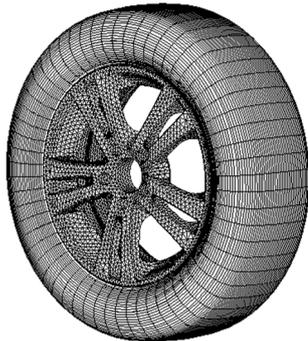


图2 带有轮辋的三维轮胎有限元网格模型

合材料。在轮胎的主体结构部分中,胎面、胎侧、内衬层、胎圈护胶和三角胶等使用硬度不同的橡胶材料;冠带层、胎体和带束层采用橡胶-帘线复合材料。超弹性的橡胶材料具有高度非线性和体积近似不可压缩的特性,Yeoh本构模型可较准确模拟其变形,该模型的简化本构方程为

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (1)$$

式中, U 为应变能密度, $C_{i0}(i=1,2,3)$ 为模型参数, I_1 为Cauchy-Green变形张量。

将试验数据基于Yeoh模型进行拟合,得到轮胎各部位的橡胶材料参数,如表1所示。

表1 轮胎橡胶材料参数(Yeoh模型)

材 料	C_{10}	C_{20}	C_{30}
胎面胶	0.751 11	-0.037 58	0.007 93
胎侧胶	0.391 58	-0.029 61	0.003 47
冠带层胶	1.017 31	-0.101 02	0.022 07
带束层胶	1.621 26	-0.070 61	0.026 08
胎体胶	0.792 66	-0.038 76	0.012 21
内衬层胶	0.546 36	-0.081 65	0.013 80
胎圈胶	1.664 22	-0.088 00	0.100 83
三角胶	1.953 35	-0.041 45	0.007 39
胎圈护胶	1.177 30	-0.096 89	0.027 16

2.2.2 橡胶-帘线复合材料

冠带层、胎体和带束层的橡胶-帘线复合材料属于正交各向异性材料。在Abaqus有限元分析软

件中,使用rebar单元模拟帘线时无需处理复合材料相关问题,但由于涉及后续整车工况下爆胎过程的仿真,本研究使用LS-DYNA软件,而该软件中没有rebar单元,同时为提升计算效率、减少轮胎有限元模型的单元,橡胶-帘线复合材料采用壳单元模拟,复合材料特性使用正交各向异性材料**MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC*描述,需要具体确定如下参数:弹性模量(E_a, E_b, E_c)、泊松比($\nu_{ab}, \nu_{ca}, \nu_{bc}$)、剪切模量(G_{ab}, G_{ca}, G_{bc})。

基于设为各向同性的基体钢丝材料和橡胶材料,选取Halpin-Tsai方程确定上述材料参数。

$$E_a = E_s V_s + E_r (1 - V_s) \quad (2)$$

$$E_b = E_r (1 + 2V_s) / (1 - V_s) \quad (3)$$

$$G_{ab} = G_r [G_s + G_r + (G_s - G_r) V_s] / [G_s + G_r - (G_s - G_r) V_s] \quad (4)$$

$$\nu_{ab} = [\nu_s V_s + \nu_r / (1 - V_s)] E_b / E_a \quad (5)$$

式中, E_s 和 E_r 分别为钢丝和橡胶的弹性模量, V_s 为钢丝在复合材料中的体积分, ν_s 和 ν_r 分别为钢丝和橡胶的泊松比, G_s 和 G_r 分别为钢丝和橡胶的剪切模量^[3-10]。

基于方程(2)~(5)可计算出4个相互独立的材料参数。基于具有横观各向同性的橡胶-帘线复合材料,由于 $E_c = E_b, \nu_{ac} = \nu_{ab}$,从而 $\nu_{ca} = \nu_{ac} E_c / E_a, G_{ca} = G_{ab}$,这样就可以计算出7个材料参数。基于橡胶为不可压缩材料的假设, $\nu_{bc} = 0.49, G_{bc} = E_b / [2(1 + \nu_{bc})]$ 。至此,9个材料参数全部计算得到,如表2所示。

表2 轮胎橡胶-帘线复合材料参数

项 目	冠带层	1#带束层	2#带束层	胎体层
密度/($\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.15	7.80	7.80	1.35
E_a/MPa	1 116.0	211 25.7	211 25.7	1 429.6
E_b/MPa	28.01	43.20	43.20	22.49
E_c/MPa	28.01	43.20	43.20	22.49
ν_{ab}	1.07e-2	8.45e-4	8.45e-4	6.11e-3
ν_{ca}	1.07e-2	8.45e-4	8.45e-4	6.11e-3
ν_{bc}	0.49	0.49	0.49	0.49
G_{ab}/MPa	9.40	14.50	14.50	7.55
G_{bc}/MPa	7.40	11.84	11.84	5.97
G_{ca}/MPa	7.40	11.84	11.84	5.97

2.3 接触设定、边界条件及加载定义等

为减小模型规模、缩短计算时间,路面和轮辋均设定为刚性。

采用LS-DYNA的隐式计算方法,分别模拟轮辋安装、加压和车身质量的加载历程。轮辋安装采取的方法是给胎圈节点定义强制位移,以达到轮胎安装效果,然后进行轮辋与轮胎间具体接触的定义。

模拟充气的方法是将0.23 MPa的压力作用在轮胎内表面。最后通过施加集中载荷的形式将载荷作用在轮辋的质心,并对刚性路面与轮胎间的具体接触进行设置。前步具体分析中的节点信息,包括位移、应力等可利用dynain文件传递到后步^[11-15]。

3 刚度特性仿真分析

3.1 垂向刚度

在轮辋设置固定完成后,给轮胎充以0.23 MPa的压力,向轮胎施加垂向载荷是以垂直向上移动地面的方法模拟,仿真结果如图3所示。

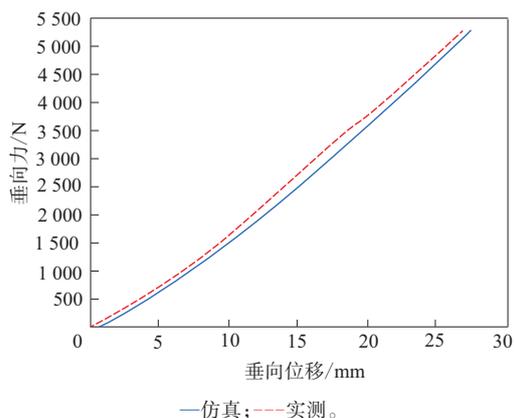


图3 轮胎垂向刚度仿真与试验特性曲线

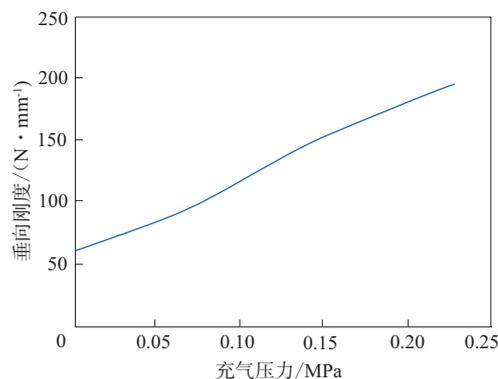
从图3可看出,仿真与试验结果的吻合较好,证明了模型垂向刚度模拟的可靠性。

在相关条件保持相同的前提下,将轮胎分别充以原充气压力的70%,50%,30%和0,获得轮胎垂向刚度与充气压力的拟合曲线,如图4所示。

从图4可知,充气压力变化对轮胎垂向刚度影响很大。轮胎垂向刚度随充气压力降低而几乎呈直线急剧下降,发生爆胎后轮胎垂向刚度大约为正常充气压力下的30%。

3.2 侧向刚度

固定轮辋并保持0.23 MPa充气压力后向上移动路面以完成车辆质量垂向载荷的施加,再通过

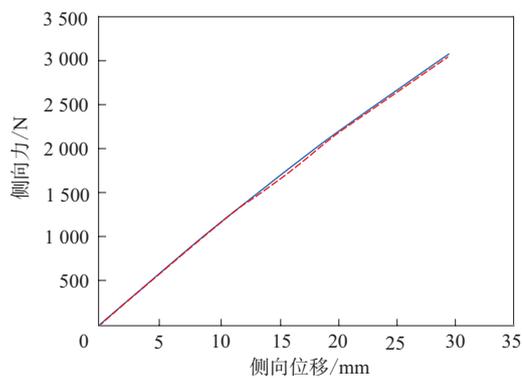


注同图3。

图4 爆胎历程轮胎垂向刚度特性曲线

侧向移动路面完成侧向载荷的施加,仿真结果如图5所示。

从图5可看出,仿真与试验结果的吻合较好,证明了模型侧向刚度模拟的可靠性。



注同图3。

图5 轮胎侧向刚度仿真与试验特性曲线

在相关条件保持相同的前提下,将轮胎分别充以原充气压力的70%,50%,30%和0,获得轮胎侧向刚度与充气压力的拟合曲线,如图6所示。

从图6可知,充气压力变化对轮胎侧向刚度的影响很大。轮胎侧向刚度随充气压力降低而呈直线下降。轮胎发生爆胎后侧向刚度约降到正常充气压力下的38%。

3.3 纵向刚度

固定轮辋并保持0.23 MPa充气压力后向上移动路面以完成车辆质量垂向载荷的施加,再通过纵向移动路面实现纵向加载,仿真结果如图7所示。

从图7可看出,仿真与试验结果吻合较好,证

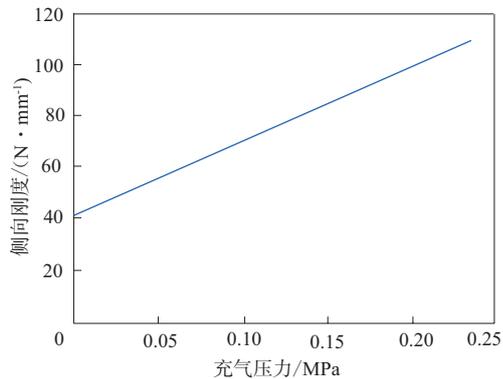
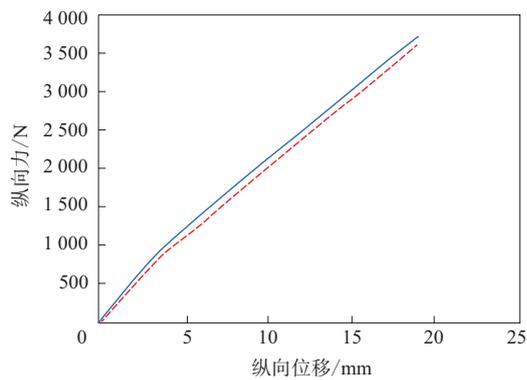


图6 爆胎历程轮胎侧向刚度特性曲线



同图3。

图7 轮胎纵向刚度仿真与试验特性曲线

明了模型纵向刚度模拟的可靠性。

在相关条件保持相同的前提下,将轮胎分别充以原充气压力的70%,50%,30%和0,获得轮胎纵向刚度与充气压力的拟合曲线,如图8所示。

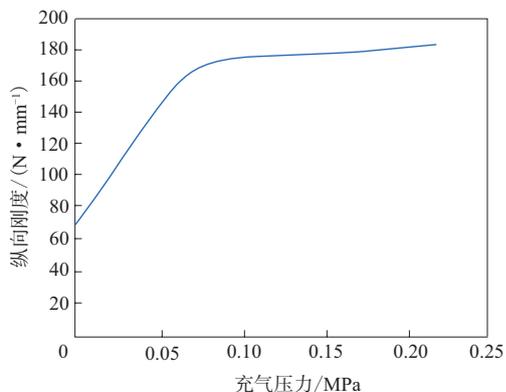


图8 爆胎历程轮胎纵向刚度特性曲线

从图8可知,轮胎爆胎前的充气压力变化对轮胎的纵向刚度几乎没影响,而发生爆胎后纵向刚度急剧下降。轮胎发生爆胎后纵向刚度约降到正常充气压力下的40%。

4 结语

本工作以215/60R16子午线轮胎为研究载体,建立轮胎三维有限元模型,对不同充气压力下轮胎在三向载荷作用下的变形进行模拟分析,结果表明,充气压力变化对轮胎刚度的影响很大,轮胎刚度随充气压力降低而急剧下降。轮胎发生爆胎后垂向刚度、侧向刚度和纵向刚度分别约降到正常充气压力下的30%,38%和40%。

本研究获得的爆胎历程轮胎三向刚度特性变化曲线具有较大的工程应用价值,可为定量分析行驶过程中发生爆胎车辆的动力学响应和操纵稳定性提供参考依据。

参考文献:

- [1] 庄继德. 汽车轮胎学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996.
- [2] 丁剑平,贾德民,黄小清. 三维非线性有限元法在子午线轮胎分析中的应用[J]. 华南理工大学学报,2005,33(6):55-58.
- [3] Tseng N T, Pelle R G, Warholic T C. Finite Element Simulation of Destructive Tire Testing[J]. Tire Science and Technology, 1991, 19(1): 2-22.
- [4] 杨卫民. 子午线轮胎的三维非线性有限元分析与性能仿真的研究[D]. 北京:北京化工大学,1998.
- [5] 石琴,陈无畏,洪洋,等. 基于有限元理论的轮胎刚度特性的仿真研究[J]. 系统仿真学报,2008,18(6):1445-1449.
- [6] 胡林,谷正气,黄晶,等. 30.00R51子午线轮胎刚度仿真[J]. 系统仿真学报,2008,20(8):2210-2214.
- [7] 景立新. 全钢载重子午线轮胎特性有限元分析及验证[D]. 吉林:吉林大学,2007.
- [8] 应卓凡,臧孟炎,周涛. 基于复杂花纹的子午线轮胎刚度特性仿真[J]. 汽车技术,2009(11):35-37.
- [9] 郭孔辉,刘青. 考虑胎体复杂变形的轮胎稳态侧偏特性理论模型[J]. 机械工程学报,1999,35(2):15-18.
- [10] 应世洲,陈方,王国林. 基于rebar单元的载重子午线轮胎模型建立及验证[J]. 轮胎工业,2007,27(8):462-465.
- [11] 安宏伟,管迪华,范成建. 轮胎静包容特性的实验研究[J]. 汽车工程,2004,26(1):57-60.
- [12] Ning X B, Meng B, Wang L. Virtual Prototype Solid Modeling and Application of Heavy Truck Brake[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(8): 2187-2190.
- [13] 张颖文. 使用因素对滚动轮胎振动特性影响的有限元分析[J]. 橡胶工业,2018,65(11):1306-1312.
- [14] 王海军,谷洲平. 汽车密封条压缩特性的CAE仿真及验证[J]. 橡胶工业,2018,65(7):814-817.
- [15] 陈瑞. 基于ABAQUS的分层注水封隔器胶筒有限元分析[J]. 橡胶工业,2018,65(9):1039-1043.

收稿日期:2019-02-22

Simulation of Tire Stiffness Characteristics during Tire Blow-out Based on LS-DYNA

CAI Yongzhou¹, ZENG Fanlin¹, OUYANG Jun¹, ZANG Mengyan²

(1. Automotive Research & Development Center, Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Guangzhou 511434, China; 2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Based on nonlinear finite element analysis software LS-DYNA, using shell element model to simulate cord-rubber composite materials, the finite element model of 215/60R16 radial tire was established, and the tire blow-out process was simulated by different inflation pressure. Under different inflation pressure, the tire deformation at vertical, transverse and longitudinal load was analyzed. The results showed that the stiffness of tire declined sharply with the decrease of inflation pressure, and the vertical, transverse and longitudinal stiffness were reduced to about 30%, 38% and 40% of normal inflation pressure after tire blow-out, respectively. The three-dimensional stiffness variation characteristics of tire under different inflation pressures obtained in this study could provide a basis for the dynamic response and handling stability analysis of tire blow-out vehicle.

Key words: tire; blow-out process; stiffness characteristics; inflation pressure; finite element analysis

废轮胎回收炭黑市场将高速增长 随着绿色轮胎产业和技术的发展,全球回收炭黑(rCB)市场将进入高速增长期。相关机构最近发布的研报认为,2018年全球rCB的市场规模的估值为5 500万美元,预计到2023年可高达4.91亿美元,2018—2023年的复合年均增长率(CAGR)可达55.0%。

rCB是废轮胎经高温热解而衍生出的一种材料,通常含有质量分数0.10~0.20的非炭质成分。rCB可以用于轮胎、非轮胎橡胶制品、塑料、涂料和油墨等各种应用领域,作为一种对环境友好和可持续发展的补强填料,广泛应用于轮胎和非轮胎橡胶制品之中。由于全球每年废轮胎繁多,因而生产rCB的固定成本相对低廉,这是推动rCB市场快速增长的重要原因。

研报预计,近5年rCB在轮胎中应用的增长率会是最高的。随着全球汽车行业的不断增长,以及该行业对环境友好和可持续发展产品的需求不断增长,绿色轮胎的需求量会大幅提升。这将推动rCB在汽车用绿色轮胎中用量的增长。

非轮胎橡胶制品用rCB的复合年均增长率处于第2位。非轮胎橡胶制品包括输送带、橡胶软管、垫圈、密封件、橡胶板、土木工程用防渗膜和橡胶屋面材料等。rCB也用于鞋类材料中,赋予胶底耐磨性能。rCB在这类应用中的增长率与橡胶制品行业以及市场对环保产品的需求不断增长有关。

北美地区是rCB全球最大的应用市场,其中美国是北美地区最大的市场,欧洲地区是全球第二大市场。轮胎、非轮胎橡胶、塑料和涂料等应用领域对环保型产品需求的日益增长,助推这些国家rCB市场增长。

废轮胎回收利用和可持续发展问题已引起各国政府与民间人士的广泛关注,包括减小炭黑生产中二氧化碳的排放量、降低炭黑的生产成本、减少市场的不稳定性以及充实和完善炭黑品种和谱系等举措都为rCB市场的健康成长提供了更多的机遇。

(摘自《中国化工报》,2019-04-04)