

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.05.003

胎压监测装置中橡胶材料本构模型的 确定及力学研究

赵成果, 范平清

(上海工程技术大学 汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:针对汽车胎压监测装置在装配和运转过程中,存在橡胶元件易损坏的问题,采用有限元法研究了元件与轮毂过盈量对橡胶材料所受应力、应变的影响。利用虚功方程确定了橡胶 Mooney-Rivlin 模型的应力-应变方程,通过单轴拉伸试验得出橡胶材料模型参数,建立了胎压监测装置的有限元模型。分析结果表明当过盈量为 0.4 mm 时既能保证装配质量又能减小运转过程中橡胶所受的应力,从而延长其使用寿命。

关键词:橡胶;虚功方程;应变能模型;过盈接触;有限元分析

中图分类号:U463.94

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2018)05-0014-05

Determination of Constitutive Model of Rubber Material in Tire Pressure Monitoring Device and Its Mechanical Study

ZHAO Chengguo, FAN Pingqing

(School of Automotive Engineering, Shanghai University Engineering of Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: There is the problem that the rubber components of the automobile tire pressure monitoring device are easily damaged during assembly and operation, the influence of the interference between the component and the hub on the stress and strain of the rubber material is studied by the finite element method. The stress-strain equation of rubber Mooney-Rivlin model was determined by the virtual work equation, the rubber material model parameters were obtained by uniaxial tensile test and the finite element model of tire pressure monitoring device was established. The analysis results show that when the interference is 0.4 mm, the assembly quality can be guaranteed and the stress on the rubber during the operation can be reduced, thus prolonging the service life.

Keywords: rubber; virtual work equation; strain-energy model; interference contact; FEA (finite element analysis)

汽车胎压监测装置可以对汽车轮胎胎压进行监测,降低因爆胎而引起的恶性车祸事件。某企业在胎压监测装置中采用了橡胶元件,利用橡胶材料的超弹性特性与钢制轮毂进行过盈装配,具有良好的密封性和稳定性,且生产成本较低。但相对于常见的合金胎压监测装置,橡胶元件在装配和运转过程中容易产生磨损和断裂,会降低装置的使用寿命。因此,分析橡胶元件工作时的承载力学特性具有重要的意义。近年来,有限元方法在橡胶制品的力学特性分析方面已有

广泛应用,但随着橡胶材料在工程上的应用日益广泛,会有新的问题亟待解决。庞辉等^[1]利用 Hypermesh 和 Radioss 分析研究了复合橡胶悬架在不同载荷作用下应力分布和刚度特性变化的初步规律。王鑫等^[2]利用转向轴轴箱橡胶节点在不同载荷工况下的最大 Green-Lagrange 应变作为疲劳破坏参数,对橡胶节点的疲劳寿命进行预测。韩传军等^[3]采用有限元软件分析了矩形橡胶密封圈密封性的各个影响因素,优化设计后提高了其密封性能。曾宪奎等^[4]通过仿真技术模拟分析了橡胶地板减震器典型工况下的静力特性,

收稿日期:2018-05-17;修回日期:2018-07-16

基金项目:国家自然科学基金(51675324)。

第一作者简介:赵成果(1993),男,江苏丰县人,硕士研究生,主要研究方向为汽车系统动力学与智能控制。E-mail: zcg19900804@163.com

得到容易产生疲劳裂纹的应力集中区域,为结构的优化提供了理论基础。笔者利用虚功方程确定 Mooney-Rivlin 模型的应力-应变方程,将通过单轴拉伸试验数据拟合得到的材料特性参数运用到仿真计算中,研究胎压装置装配及运转过程中橡胶元件的应力、应变分布状况,为其他橡胶构件的有限元分析提供一定的参考。

1 Mooney-Rivlin 模型参数确定

假设橡胶材料各项同性且体积不可压缩,橡胶材料唯象理论本构模型的应变能函数为^[5]:

$$W = W(I_1, I_2, I_3). \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2; \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2; \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\lambda_i = 1 + \gamma_i. \quad (3)$$

式中: W 为应变能; I_1, I_2 和 I_3 分别为橡胶的变形张量不变量; λ_i 为橡胶的主伸长比, γ_i 为主轴方向应变, i 取值 1, 2 和 3, 分别表示 X, Y 和 Z 轴方向。

引入 Lagrange 乘子, 应变能函数修正为^[6]:

$$W = W(I_1, I_2) + h(I_3 - 1). \quad (4)$$

式中 h 为 Lagrange 乘子, 其物理意义为静水压力。

根据 Mooney-Rivlin 模型, 式(4)可写成:

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + h(I_3 - 1). \quad (5)$$

式中: c_{10} 和 c_{01} 为 Mooney-Rivlin 模型参数。

由 Kirchoff 应力张量 t_{ij} 和 Green 应变张量 γ_{ij} 之间的关系, 可得到^[7]:

$$t_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \gamma_{ij}} = \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \gamma_{ij}} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \gamma_{ij}} + \frac{\partial W}{\partial I_3} \frac{\partial I_3}{\partial \gamma_{ij}}. \quad (6)$$

联立式(2), (5) 和 (6), 可得橡胶材料主应力 t_i 与其主伸长比 λ_i 之间的关系:

$$t_i \lambda_i = 2 \left(\lambda_i^2 c_{10} - \frac{1}{\lambda_i^2} c_{01} \right) + h. \quad (7)$$

式中: t_i 下角标分别取值 1, 2, 3, 表示 3 个方向上的主应力。

由式(7)可求得:

$$t_1 \lambda_1 - t_2 \lambda_2 = 2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)(c_{10} + \lambda_3^2 c_{01}), \quad (8)$$

橡胶材料单轴拉伸试验时, $t_2 = t_3 = 0$ 。

结合式(8), Mooney-Rivlin 材料模型的应力-应变方程可表示为:

$$\frac{t_1}{2(\lambda_1 - 1/\lambda_1^2)} = c_{10} + \frac{1}{\lambda_1} c_{01}. \quad (9)$$

根据单轴拉伸试验测得不同 λ_1 下对应的 t_1 , 以 $\frac{1}{\lambda_1}$

作横坐标, $\frac{t_1}{2(\lambda_1 - 1/\lambda_1^2)}$ 作纵坐标, 将数据拟合成曲线, 截距即为 c_{10} , 斜率为 c_{01} 。

参照试验机标准, 取胎压监测装置中采用的 EPDM 橡胶为原料, 试样制成哑铃状, 如图 1 所示。试件狭窄部分的标准厚度为 (2.0 ± 0.2) mm, 长度为 (45 ± 0.5) mm。单轴拉伸试验在 YG065 型电子织物强力仪上进行, 实验过程中下夹具固定不动, 上夹具沿轴向以 100 mm/min 的速度进行加载, 试验机采样频率设定为 1 Hz, 连续监测力和位移的变化值, 得到相关的单轴拉伸数据, 试验设备如图 2 所示。



图 1 橡胶标准样件
Figure 1 Rubber standard sample



图 2 橡胶标准样件拉伸
Figure 2 Rubber standard sample stretching

试件分 2 组每组各 4 个进行单轴拉伸试验, 将 2 组试验测得的拉伸力与位移关系进行对比分析, 选取其中试验数据相对集中的一组。为减少误差, 取 4 次测试结果的平均值做 λ_i - t_i 表, 如表 1 所示, 其中设 $x = 1/\lambda_1$, $y = t_1/[2(\lambda_1 - 1/\lambda_1^2)]$ 。

表 1 标准件单轴拉伸 λ_i - t_i 表

Table 1 Standard sample uniaxial stretching λ_i - t_i

λ_1	λ_2	λ_3	t_1/MPa	x	y/MPa
1.365	0.856	0.856	1.330	0.732 6	0.802 9
1.583	0.795	0.795	2.080	0.631 7	0.878 4
1.777	0.750	0.750	2.583	0.562 7	0.884 4
1.901	0.725	0.725	3.000	0.526 0	0.923 5
2.143	0.683	0.683	3.830	0.466 6	0.994 7
2.335	0.654	0.654	4.583	0.428 3	1.065 0
2.549	0.626	0.626	5.417	0.392 3	1.130 9
2.770	0.601	0.601	6.167	0.361 0	1.168 1
2.966	0.581	0.581	6.833	0.337 2	1.197 8
3.191	0.560	0.560	7.750	0.313 4	1.252 9
3.326	0.548	0.548	8.167	0.300 7	1.262 0
3.455	0.538	0.538	8.750	0.289 4	1.297 7
3.639	0.524	0.524	9.420	0.274 8	1.321 7
3.985	0.501	0.501	10.750	0.250 9	1.370 5
4.398	0.477	0.477	12.250	0.227 4	1.409 2

根据表1数据进行线性拟合,得到如图3所示的拟合曲线,由此得出, $c_{10} = 1.648\ 2$, $c_{01} = -1.273\ 7$ 。

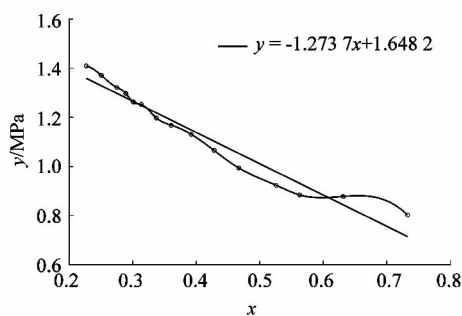


图3 Mooney-Rivlin 模型参数的拟合直线

Figure 3 Linear line of Mooney-Rivlin model parameters

2 橡胶元件的有限元分析

以橡胶材料作衬套的胎压监测装置在安装过程中采用传统装配方法中的压力压装法^[8-9],即用安装器械将其装入口径较小的气门嘴中,然后利用橡胶材料的高弹性的力学特性实现与钢制轮毂气门嘴的过盈装配。此安装法安装方便且密封性良好。在胎压监测装置装配、运作过程中,装置失效的主因是与轮毂直接接触的橡胶部分磨损断裂而造成的。企业相关实验表明,增大橡胶与轮毂的过盈量可以使两者紧密的固定在一起而减少摩擦力的产生,但偏大的过盈量会使装配变得困难甚至引起橡胶的破损,所以在保证装配质量的前提下选择合适的过盈量便显得尤为重要。

笔者通过大型非线性有限元软件 Abaqus 模拟橡胶元件的加载工况,得出不同过盈量时橡胶部分装配与运转时的应力、应变分布,以求获得较为合理的过盈量,为企业的优化设计提供一定的参考。

2.1 有限元模型的建立

将胎压监测装置的三维模型导入到 Hypermesh 中,如图4所示。为减少计算量和使计算容易收敛,首先对模型进行简化处理,仅保留与橡胶元件使用寿命有密切关联的部分,进行六面体网格划分,对与轮毂接触受力变形的橡胶部分网格细化处理。网格划分结束后导入到 Abaqus 中赋予模型材料参数和单元类型。其中,橡胶是一种典型的不可压缩材料,采用三维八节点杂交单元 C3D8H 进行模拟。铜芯和钢制轮毂都为八节点六面体单元,如图5所示。

有限元模拟所使用的铜芯和钢制轮毂材料的相关参数如表2所示。橡胶材料采用拟合得到的 Mooney-Rivlin 模型参数。

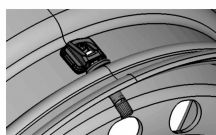


图4 装置三维模型

Figure 4 Device model



图5 装置网格划分

Figure 5 Device meshing

表2 模型中的材料相关参数

Table 2 Material-related parameters in model

材料	弹性模量/GPa	泊松比
铜芯	105	0.324
钢制轮毂	210	0.300

1) 模拟工况 I:橡胶元件内壁与铜芯采用绑定约束,外壁与轮毂采用过盈接触,同时轮毂的内壁以 Abaqus 特有的点面刚性耦合约束的形式约束,如图6所示。约束轮毂刚体节点除轴向外的所有自由度,并对其施加轴向转速,模拟轮毂转动。

2) 模拟工况 II:橡胶内壁、外壁与铜芯和轮毂的接触设置不变,约束轮毂所有的自由度,在橡胶外壁上施加一个斜角为 60° 的集中力,模拟装置装配时的加载,如图7所示。

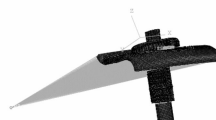


图6 刚性耦合约束示意
Figure 6 Rigid coupling constraints



图7 装配工况示意
Figure 7 Assembly working condition

利用 Abaqus 求解时,橡胶元件会因过盈接触和材料本身的非线性特性而容易导致有限元分析结果不收敛,因此加载过程使用多载荷步分步加载^[10]。初始加载时仅设置微量的载荷和过盈量来模拟接触的建立,后续载荷步中施加实际载荷进行仿真分析。

2.2 仿真结果分析

通过有限元模拟轮毂转动和装配加载得到的橡胶元件的应力云图如图8~11所示。此时过盈接触量为 0.2 mm,利用 Mooney-Rivlin 模型所得的橡胶元件旋转过程和装配加载过程中最大应力分别为 0.253 5 和 1.745 0 MPa,最大应变为 0.024 62 和 0.085 59,且集中在与轮毂接触区域。

为研究过盈量大小对应力、应变分布产生的影响,通过在有限元模型中调整轮毂气门嘴直径大小来调控过盈量,这个模拟存在误差,但对分析结果不会产生实

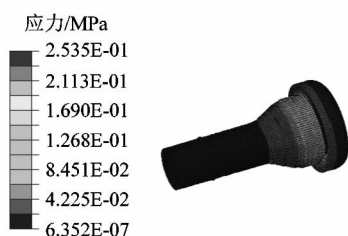


图8 旋转应力云图

Figure 8 Rotational stress cloud



图9 旋转应变云图

Figure 9 Rotational strain cloud

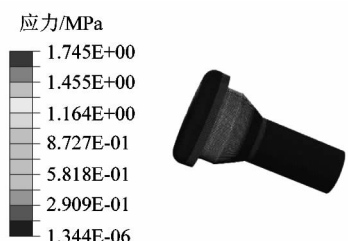


图10 装配应力云图

Figure 10 Assembly stress cloud



图11 装配应变云图

Figure 11 Assembly strain cloud

质上的影响。根据有限元计算结果,用 MATLAB 软件拟合不同过盈量下旋转和装配工况对应的最大应力、应变曲线,如图 12~13 所示。

从图 12~13 看出,在载荷保持不变的条件下,随着过盈量的增大,旋转工况下橡胶元件所受应力、应变均会逐渐减小,而装配工况下则逐渐增大,与实际应用相符。考虑到旋转工况下橡胶元件的极大循环次数,在保证装配工况下元件所受应力在其拉伸极限允许范围内时,应尽可能的增大过盈量。图 12 中可以看出,在 0.1~0.4 mm 的过盈量范围内,旋转工况曲线斜率

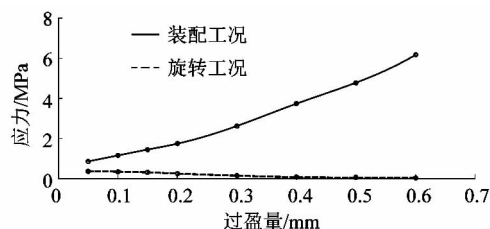


图12 过盈量-应力曲线

Figure 12 Interference-stress curve

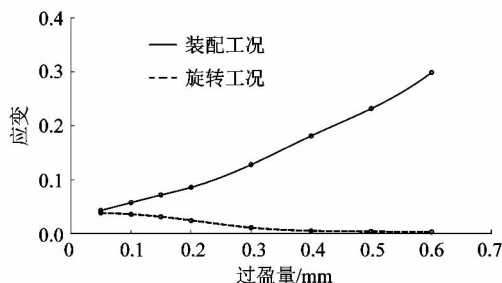


图13 过盈量-应变曲线

Figure 13 Interference-strain curve

显著变化,当过盈量大于 0.4 mm 时,曲线变化幅度很小,且此时装配工况下元件所受应力小于拉伸极限 12 MPa,所以过盈量 0.4 mm 应是既保证装配质量又能有效提高橡胶元件循环次数的最优选择。

3 结论

课题组利用虚功方程确定了工程上常用的橡胶 Mooney-Rivlin 模型的应力-应变方程,并结合橡胶材料单轴拉伸试验数据,拟合该模型参数 c_{10} , c_{01} 的值并用于仿真计算。根据仿真计算结果得出合适的过盈量来提高橡胶元件的使用价值,为企业的优化设计提供一定的理论基础。

采用虚功方程计算 Mooney-Rivlin 模型参数,可以将橡胶材料的非线性方程进行线性化,进而降低拟合难度和提高准确性,为橡胶材料的有限元分析提供参考。根据 Yeoh、Neo-Hookean 及 Ogden 等橡胶本构模型和 Mooney-Rivlin 模型的应变能密度函数的相似性,虚功方程可以应用到以上模型的线性化计算当中。

参考文献:

- [1] 庞辉,刘家连,彭威. 载重汽车复合悬架力学特性有限元分析[J]. 机械设计, 2014, 31(3): 59-62.
- [2] 王鑫,吴智强,吴绍利,等. 转向架轴箱橡胶节点疲劳寿命的有限元分析[J]. 铁道机车车辆, 2014, 34(2): 51-54.
- [3] 韩传军,张杰. 矩形橡胶密封圈的有限元分析及优化[J]. 橡胶工业, 2013, 60(2): 98-103.
- [4] 曾宪奎,苗清,郝建国,等. 基于 ABAQUS/FE-SAFE 的动车组橡胶地板减振器疲劳寿命研究[J]. 弹性体, 2016, 26(5): 49-63.

(下转第 23 页)