

车用橡胶衬套疲劳的有限元分析

黄鹏程,王聪昌,陈凯

(泛亚汽车技术中心有限公司,上海 201201)

摘要:采用 Van der Waals 本构方程模拟橡胶材料的力学性能,在准确拟合橡胶衬套刚度特性的基础上,对其垂向跳动和侧向转弯载荷工况下的疲劳寿命进行分析计算。根据橡胶衬套的最大主拉伸应变和应变能密度参数,结合橡胶试样的应变能密度-寿命曲线,可对扭转梁式后轴橡胶衬套的耐久性进行有效地预测。

关键词:橡胶;衬套;应变能密度;耐久性;有限元分析

中图分类号:TQ336.4⁺2;O241.82 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2013)08-0488-05

橡胶是一种具有良好弹性的工程材料,能承受大应变而不会发生永久性的变形和断裂。在汽车行业中,为了提高车辆的 NVH[噪声(Noise)、振动(Vibration)和声振粗糙度(Harshness)]性能,橡胶材料被广泛应用在各种减震降噪装置中。在橡胶产品的开发中重点关注的性能要求有两项:刚度和耐久性。目前,国内橡胶产品的设计开发主要依托试验进行验证,从而使产品设计周期长、开发费用高。在项目开发的早期,通过虚拟分析的方法有效预测橡胶悬置的刚度和耐久性可节省费用,缩短开发周期。本工作以某车型后轴橡胶衬套为例,重点对车用橡胶的耐久性能进行深入研究。

1 基本原理

1.1 橡胶材料的本构模型

与金属材料不同,在形变过程中,表征橡胶材料力学性能的应力-应变关系是非线性的。在 Abaqus 有限元分析软件中,橡胶类超弹性材料采用应变势能描述,根据应变势能表达形式不同提供了多种本构方程。相对而言,在橡胶材料测试数据充足的条件下,Ogden 和 Van der Waals 本构方程可以更准确地拟合试验结果。本研究采用 Van der Waals 本构方程,它基于热力学的统计理论^[1-2],其应变能函数为

$$U = \mu \{ -(\lambda_m^2 - 3) [\ln(1 - \eta) + \eta] -$$

$$\frac{2}{3} \alpha \left(\frac{\bar{I} - 3}{2} \right)^{3/2} \} + \frac{1}{D} \left(\frac{J_e^2 - 1}{2} - \ln J_e \right)$$

$$\bar{I} = (1 - \beta) \bar{I}_1 + \beta \bar{I}_2$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\bar{I} - 3}{\lambda_m^2 - 3}}$$

式中, U 为单位参考体积的应变能; $\mu, \lambda_m, \alpha, \beta, D$ 均为材料的本构模型参数, μ 为初始剪切模量, λ_m 为锁死应变,位置大约在应力-应变曲线最陡的地方, α 为全局作用参数, β 为把第一和第二应变偏量不变量 $\bar{I}_1$ 和 $\bar{I}_2$ 组合成应变不变量 $\bar{I}$ 的线性参数, D 反映材料的可压缩性(如 $D=0$,说明材料是完全不可压缩的); J_e 为弹性体积比。 $\bar{I}_1$ 和 $\bar{I}_2$ 可以用应变偏张量($\bar{\lambda}_i$)表示:

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2$$

$$\bar{I}_2 = \bar{\lambda}_1^{-2} + \bar{\lambda}_2^{-2} + \bar{\lambda}_3^{-2}$$

式中, $\bar{\lambda}_i = J^{-1/3} \lambda_i (i=1, 2, 3)$, J 为总体积比, λ_i 为主伸长率。

1.2 橡胶材料的耐久性预测方法

橡胶材料疲劳失效通常包含 2 个清晰的过程^[3]:微裂纹形成和成核的微裂纹扩展至失效点。相应地,橡胶疲劳寿命分析方法可以分为两种:裂纹成核法和裂纹扩展法。

裂纹扩展法主要研究预先存在于结构中的初始微小裂纹在各种使用环境下扩展到临界尺寸的循环次数。橡胶零件的寿命大多取决于小裂纹的生长。橡胶疲劳分析中应用裂纹扩展法的最大困难在于需要确定这些小裂纹的能量释放率,预测生长最快裂纹的位置和路径,特别是当几何形状

和载荷复杂时^[4]。

裂纹成核法主要研究造成某种尺寸的疲劳裂纹出现的循环次数。典型的裂纹成核法有应力-寿命法^[5]和应变-寿命法^[6]。随着裂纹扩展模型的开发成功,橡胶裂纹成核寿命法有了很大进展,应变能密度逐渐成为预测疲劳的一个参数。应变能密度是对内在缺陷能量释放率的一种衡量。对橡胶零件的高疲劳寿命进行预测,应变能密度-寿命法的一致性比其他方法好。本研究对橡胶衬套的疲劳寿命预测采取裂纹成核法,以应变能密度为评价参数,建立疲劳分析流程,如图 1 所示。

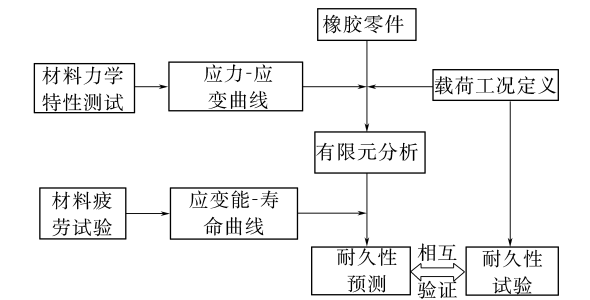


图 1 橡胶疲劳分析流程

2 橡胶衬套静刚度预测

橡胶零件的静刚度大致可分为 2 个区域:线性区和非线性区。橡胶衬套线性区的刚度主要取决于橡胶主簧的刚度,对系统的隔震性能有重要影响;非线性区的刚度不仅包括橡胶主簧的刚度,还包括限位结构起作用后的接触刚度,保证系统在预定的设计空间中运动。

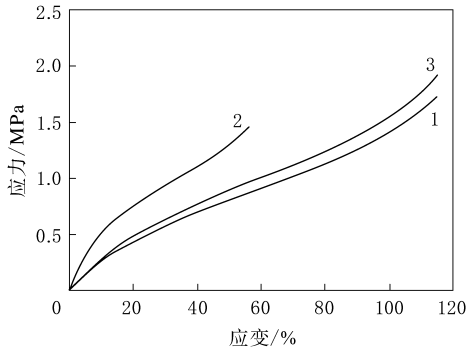
静刚度预测不仅可以检查分析模型的合理性,还可以对系统的动力学和 NVH 性能分析提供准确的数据支持。

2.1 橡胶材料的力学特性测试

对后轴衬套的橡胶材料进行力学特性测试,得到单轴拉伸、等双轴拉伸和平面拉伸试验的应力-应变曲线,如图 2 所示。

2.2 静刚度分析模型

采用 Abaqus 有限元分析软件建立某后轴衬套的有限元模型,如图 3 所示。橡胶部分和钢圈部分分别采用超弹性单元 C3D4H 和实体单元 C3D6 建模,橡胶外表面与钢圈内表面采取共节点处理。橡胶内孔面通过一个刚性单元耦合,参



1—单轴拉伸;2—等双轴拉伸;3—平面拉伸。

图 2 橡胶材料的力学特性曲线

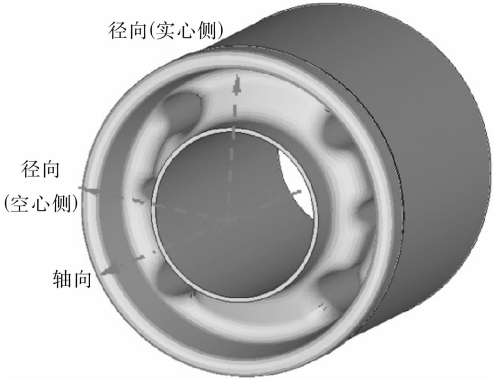


图 3 橡胶衬套三维有限元模型

考点为内管几何中心,作为刚度分析的加载点。另外,用一个刚性单元将钢圈外表面节点耦合起来,参考点也在内管几何中心,作为刚度分析的约束点。在橡胶径向空心侧可能出现接触的区域定义接触对,摩擦因数为 0.4。

2.3 刚度拟合

约束衬套内孔刚性面参考点的六向自由度,在外表刚性面参考点施加位移载荷,对静刚度进行模拟计算,主要方向的仿真和试验结果对比如图 4 所示。

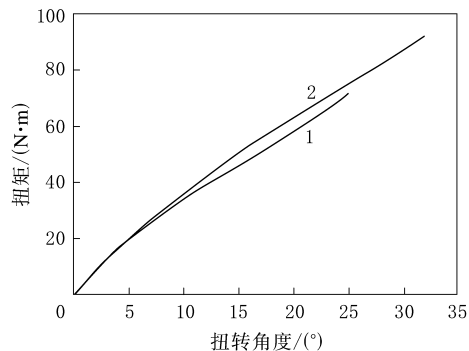
从图 4 可以看出,仿真与试验的刚度曲线吻合程度很好,表明该有限元模型能够准确反映实际橡胶零件的物理特性。

3 橡胶衬套耐久性预测

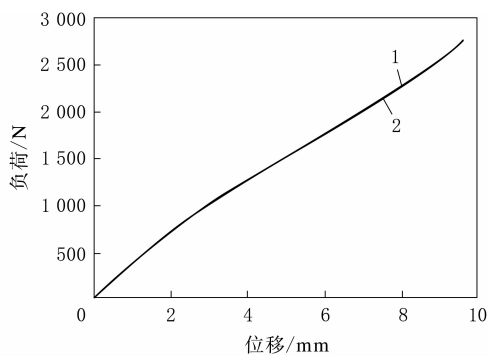
本研究基于扭转梁式后轴开发的衬套耐久性试验台架如图 5 所示。采用应变能密度-寿命法对橡胶衬套的疲劳寿命进行预测和验证。

3.1 橡胶材料的应变能-寿命曲线

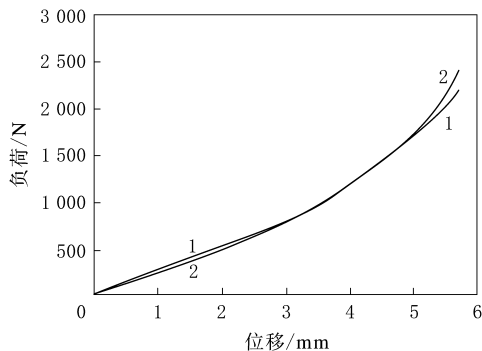
在不同应变能密度下,对橡胶试样进行耐久



(a) 轴向扭转



(b) 轴向压缩



(c) 实心侧压缩

1—试验;2—仿真。

图4 静刚度仿真与试验结果对比

性试验,得到材料的应变能-寿命数据,按最小二乘法进行拟合,得到疲劳寿命(N_f)与应变能密度(S_E)之间的关系:

$$N_f = 69\,965 S_E^{-1.649} \quad (1)$$

3.2 耐久性分析模型

由于后轴衬套的轴向与转动轴线之间存在一定的夹角,为了模拟实际安装状态,同时兼顾分析效率,耐久性模型采用等截面梁单元进行简化。

另外,为了考虑过盈装配的影响,在钢圈外面

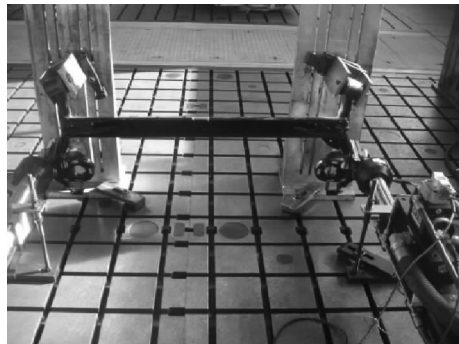


图5 橡胶衬套耐久性试验台架

建立一个与之等半径的圆柱形解析刚性面,参考点为后轴纵臂的前端点。在钢圈外表面与解析刚性面之间定义接触,设置过盈量为2.5 mm,摩擦因数为0.15。

约束衬套内孔刚性单元主节点的六向自由度,在左右轮心加载。根据载荷施加方式的不同,轮心位置的约束有区别:位移控制,只需在轮心施加相应的位移即可;力控制,除了在轮心处施加作用力外,还要约束垂向跳动自由度。后轴及衬套的耐久性分析模型如图6所示。

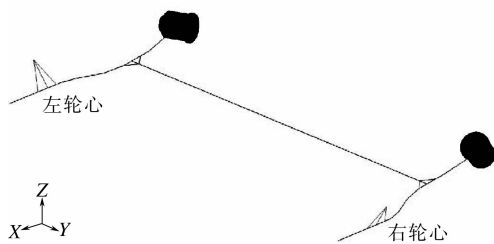


图6 后轴及衬套的耐久性分析模型

3.3 载荷工况

后轴主要承受整车纵向载荷(加速或制动)和侧向载荷(转弯)以及垂向载荷(悬架跳动)等。后轴衬套的疲劳失效一般出现在橡胶主簧上。纵向受载时,衬套径向承载,橡胶主簧变形相对较小,不容易产生疲劳失效。侧向和垂向受载时,橡胶主簧会出现大的拉伸变形,其最小截面或根部容易产生疲劳开裂。对橡胶衬套的耐久性能应重点关注垂向和侧向受载工况,具体定义如下。

垂向跳动:位移控制, Z 向位移0~131 mm;

侧向转弯:力控制,右侧轮心加载, Y 向作用力-4 470~+1 010 N。

3.4 分析结果与试验对比

采用 Abaqus/STANDARD 求解器对后轴衬

套进行分析计算,施加载荷分为 2 步:过盈量计算和耐久性工况计算。通过有限元计算,得到橡胶衬套的主应变和应变能密度值。

垂向跳动工况下,应变能密度的峰值出现在橡胶主簧与外侧的圆弧过渡区域。比较主应变值,该区域处于拉伸状态,由此确定为首先发生失效的危险点,与台架试验中最初出现开裂的位置一致,如图 7 所示。



图 7 失效位置对比(垂向跳动)

将有限元计算得到的应变能密度参数代入式(1),得到危险点的疲劳寿命,模拟分析与台架试验结果对比如表 1 所示。

项 目	垂向跳动	侧向转弯
分析模拟		
应变能密度/(J · m ⁻³)	0.96	0.36
寿命/次	74 836	377 067
试验寿命/次	76 970	277 500

从分析与试验结果对比来看:垂向跳动工况下,应变能密度高,橡胶主簧局部充分拉伸,接近试样疲劳测试的状态,模拟分析相对试验结果误

差小;侧向转弯工况下,应变能密度小得多,橡胶主簧局部应变较复杂,分析与试验结果误差较大,但与台架试验的分散度相比,还是可以接受的。

综上所述,采用应变能密度参数并结合主应变值,可以准确识别橡胶零件发生失效的危险位置;在此基础上采用应变能密度-寿命法可以进一步对危险位置的疲劳寿命进行有效预测。

4 结语

本研究利用 Abaqus 有限元软件进行后轴衬套的刚度拟合,在此基础上对相关耐久性工况下的疲劳寿命进行预测和评估,模拟分析和试验验证得到如下结论。

(1)根据橡胶材料的力学特性曲线,采用 Van der Waals 本构方程能准确模拟橡胶衬套的各向刚度,验证有限元模型可以有效反映实际零件的物理特性。

(2)基于橡胶材料的应变能密度-寿命曲线,结合实际零件的应变能密度分布和应变状态,能够准确识别橡胶零件的潜在失效位置,并有效地预测疲劳寿命。

本研究的耐久性分析方法应用在受力状态简单的橡胶零件上效果明显,如动力总成悬置等。对于承受多轴应力的橡胶零件的疲劳预测,需要进行更多的分析与验证。

参考文献:

[1] 黄友剑. 城市地铁轨道减振器结构及性能研究[D]. 长沙:中南大学,2004.

[2] 郑明军. 橡胶件的静、动态特性及有限元分析[D]. 北京:北方交通大学,2002.

[3] Mars W V, Fatemi A. A Literature Survey on Fatigue Analysis Approaches for Rubber[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24: 949-961.

[4] 戴永谦, 宋希庚, 薛冬新, 等. 裂纹生长方法在橡胶疲劳分析中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2005, 24(4): 115-117.

[5] Dobrinka Atmadzhova. A Method to Evaluate the Service Life of Rubber Springs in Rolling-stock[J]. Mechanics Transport Communications, 2008(2): 11-14.

[6] Woo C S, Kim W D, Kwon J D. A Study on the Material Properties and Fatigue Life Prediction of Natural Rubber Component[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 483-484: 376-381.

Finite Element Analysis on Fatigue Life of Rubber Bush for Vehicles

HUANG Peng-cheng, WANG Cong-chang, CHEN Kai

(Pan Asia Technical Automotive Center Co., Ltd, Shanghai 201201, China)

Abstract: The mechanical property of rubber material was simulated by using Van der Waals equation, and the fatigue life of rubber bush was calculated under vertical jitter conditions and lateral turn with loading based on the accurate fitting of the stiffness. The durability of the rubber bush for the rear axle of torsion beam was effectively assessed by using the maximum principal tensile strain, strain energy density, and the relationship curve of the strain energy density and service life of rubber specimen.

Key words: rubber; bushing; strain energy density; durability; finite element analysis

橡胶原料进口价格低位徘徊

中图分类号: TQ332; TQ333 文献标志码: D

海关总署最新数据显示, 2013年1—4月我国累计进口天然橡胶(NR) 86万t, 同比增长32.7%; 进口总额为24.54亿美元, 同比增长10.9%。其中4月份进口NR 23万t, 环比持平, 同比增长35.29%; 进口金额为6.53亿美元, 环比下降3.77%。

合成橡胶(SR)方面, 2013年1—4月累计进口52.37万t, 同比增长9.6%; 进口总额为15.8亿美元, 同比下降9.5%。其中4月份进口SR 13万t, 环比下降11.86%, 同比上涨10.18%; 进口金额为4.02亿美元, 环比下降9.67%。

业内人士分析指出, 我国NR进口价格下降主要缘于全球需求不振。例如NR重要消费国日本2013年一季度汽车销售量大幅下滑, 导致NR消费下降。此外, 欧洲乘用车销售量连跌18个月, 也影响了全球NR的需求。2013年3月欧盟汽车销售量130.7万辆, 同比下降10.2%; 一季度销售量为298.9万辆, 同比下降9.8%。

对于NR未来的进口价格走势, 不少业内人士认为, 目前我国海南和云南产胶区均已进入开割期, 新胶正陆续上市, 增加了现货市场的供应压力。同时, NR生产大国泰国也进入开割期, 从5月份起进入产胶旺季。自6月份起, 泰国每月将向现货市场提供30万t左右的新胶, 马来西亚和越南每月将提供7万t以上的新胶。新胶上市对现货市场将构成极大压力, 在终端需求没有好转

的情况下, 橡胶价格回升的压力极大。

与NR相似, 2013年前4个月SR进口价格也处于低位徘徊状态, 进口总额较2012年同期有所下降, 中国合成橡胶工业协会副秘书长周文荣表示, 因为部分SR和NR相互可以替代, 所以SR价格受NR价格影响较大。

周文荣还指出, 虽然2013年前4个月进口量同比有所增长, 但尚无法预计全年进口量是否会增长。2012年进口量较2011年有所下降, 因此2013年总进口量可能会延续趋于下降的势头。一是因为轮胎企业没有开足马力生产, 丁苯橡胶、异戊橡胶和顺丁橡胶的70%~80%用于轮胎制造, 而2013年轮胎需求增幅放缓, 自然会影响SR的需求。二是国内SR项目投产增多, 从2011年起, 我国SR产能过剩势头显现, 除了乙丙橡胶, 其他品种开工率都不高, 而目前这一形势逐渐恶化, 有的企业即将投产, 有的甚至还在立项。预计2013年我国SR新增产能70万t以上, 主要为顺丁橡胶、丁苯橡胶和丁基橡胶。2012年全国SR总产能为400万t, 开工率为71%; 预计2013年总产能将近500万t, 开工率降至70%以下。三是目前SR库存压力大。四是NR供应量比较充足, 国际NR的库存增加, 国际上种植量增长。

对于SR的出口, 周文荣指出, 2012年我国SR出口量为20万t, 但也不到总产量的10%, 主要品种是丁苯橡胶、顺丁橡胶和丁基橡胶等, 预计2013年出口量将有所增长。

(摘自《中国化工报》, 2013-05-30)