

初始内压和帘线间距对膜式空气弹簧 横向刚度特性影响的有限元分析

张俊玲, 王浩宇

(贵州工业职业技术学院 机械与电气学院, 贵州 贵阳 550000)

摘要:运用 ABAQUS 分析软件建立膜式空气弹簧的有限元模型, 通过仿真计算获得负荷-横向位移曲线, 研究初始内压和帘线间距对膜式空气弹簧横向刚度的影响。结果表明, 空气弹簧的横向刚度随着初始内压的提高而增大, 同时由于空气弹簧膨胀造成帘线间距增大, 引起横向刚度降低。本研究为膜式空气弹簧设计中合理选择初始内压和帘线间距提供了参考。

关键词:空气弹簧; 初始内压; 帘线间距; 横向刚度; 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)04-0233-06

空气弹簧是利用压缩空气的非线性恢复力实现隔震和缓冲作用的一种非金属弹簧, 具有变刚度、低自振频率、高度可控以及良好的高频振动吸收和隔声性能等特点。自美国 Borgward 公司首次成功地在载重汽车上采用空气弹簧作为悬架系统弹性元件以来, 空气弹簧在公路交通车辆领域逐步得到了广泛的应用^[1-2]。

空气弹簧是空气悬架的核心部件, 因此在空气弹簧的设计过程中, 为得到符合空气悬架参数要求的横向刚度, 可通过调整不同初始内压、帘线间距、帘线角度和帘布层数等参数来优化。

初始内压增大导致空气弹簧橡胶气囊囊体膨胀加大, 引起帘线间距变化, 而帘线间距变化对空气弹簧的横向刚度产生相应的影响。同时, 空气弹簧的横向刚度也会随着初始内压的增大而变化。

本工作运用有限元分析软件 ABAQUS 对某一膜式空气弹簧分别建立囊体、气体单元和帘布层的有限元模型, 分析初始内压和帘线间距对膜式空气弹簧横向刚度特性的影响, 从而选择合理的初始内压和帘线间距, 同时对这两个相互影响的参数进行对比研究。

作者简介:张俊玲(1973—), 女, 贵州贵阳人, 贵州工业职业技术学院副教授, 工程硕士, 主要从事汽车零部件理论及应用的科研和教学工作。

1 空气弹簧有限元模型的建立

1.1 材料和边界接触模型

1.1.1 胶囊材料模型

空气弹簧胶囊是由帘线和橡胶硫化而成的复合材料, 同时各层互成一定角度布置, 帘布层是主要的承载部件, 因而呈现出各向异性的特点。橡胶材料是体积模量远大于弹性模量的各向同性、不可压缩的超弹性材料, 其力学性能可以用应变能密度函数描述。本研究采用二参数的 Mooney-Rivlin 模型描述橡胶类不可压缩超弹性材料的应变势能(U)。

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D}(J^e - 1)^2 \quad (1)$$

式中, C_{10} , C_{01} 和 D 为与温度有关的材料参数; J^e 为弹性体积比; $\bar{I}_1$ 和 $\bar{I}_2$ 为第一和第二偏应变变量, 其定义为

$$\bar{I}_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2)$$

$$\bar{I}_2 = \lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2} \quad (3)$$

式中, λ_1 , λ_2 和 λ_3 分别为 X , Y 和 Z 轴方向的拉伸系数。

初始剪切模量(μ_0)和体积弹性模量(K_0)为

$$\mu_0 = 2(C_{10} + C_{01}) \quad (4)$$

$$K_0 = \frac{2}{D} \quad (5)$$

如果 $D=0$, 表示材料完全不可压缩。该材料

模型能很好地描述变形小于150%的橡胶材料力学性能,完全满足橡胶材料实际应用的性能计算要求^[3]。

1.1.2 气体模型

空气弹簧胶囊体腔内的气体压力随所受载荷变化而变化,实现空气弹簧反作用力和载荷的动态平衡。在进行空气弹簧刚度特性分析时,假设空气弹簧胶囊体腔内的气体类型为理想气体,有限元分析软件 ABAQUS 中的充腔流体单元能够使空气弹簧橡胶气囊变形和作用在气囊边界上的气体压力之间相互耦合,腔内的气体压力可通过腔内容积的变化来模拟。腔内的气体质量(m)一定,其容积(V)是腔内充入气体的压力(p)和温度(θ)的函数:

$$V(p, \theta) = m/\rho(p, \theta) \quad (6)$$

式中, ρ 为气体的密度。

充入膜式空气弹簧腔内气体的总质量等于气体单元的总质量。由虚功原理知,单个单元的虚功可以用总体的虚功来表示,得到腔内气体压力容积的表达式:

$$\frac{dV}{dp} = -\frac{m}{\rho_a} \cdot \frac{(\theta - \theta_b)(p_a + p_b)}{(\theta_a - \theta_b)(p + p_b)} \quad (7)$$

式中, θ_a 和 p_a 是在参考密度 ρ_a 时的温度和压力; θ_b 为绝对零度; p_b 为环境压力。

本研究采用的腔体单元可以模拟膜式空气弹簧的实际工况。该气体模型通过腔内容积的变化反映气体压力的变化,将气体压力施加在气体单元上,获得膜式空气弹簧在横向位移变化时的气体压力变化。

1.1.3 帘布层模型

帘线是橡胶囊体的主要受力部件,由于帘布层和橡胶的拉伸模量不同,使帘布层呈现出复杂的力学各向异性和非线性特性。本研究采用 ABAQUS 软件中的 Rebar 单元模拟在橡胶囊体壳单元中的帘布层,使用这种单元对增强帘线复合材料的几何和物理非线性进行分析具有很好的效果。在 Rebar 模型中将有限元变形理论与实际结构模型相结合,可以得到帘线与橡胶复合材料在不同组分下的力学特性^[4]。以空气弹簧内势能反映其力学特性,可得到橡胶囊体和帘布层两部分的内势能,设定囊体所对应 Rebar 单元的几何

特性和弹性模量便可建立空气弹簧帘布层模型。

1.1.4 边界接触模型

空气弹簧工作过程中橡胶气囊与上、下盖板之间及气囊之间的非线性接触问题采用 Lagrange 法,通过定义变形体与变形体、变形体与刚性体两种接触方式来处理。从接触边界变形协调变分原理出发,建立接触系统的控制方程^[5],其相应的边界接触协调条件为

$$C_j^T \Delta_k = C_j^T (\text{t}\Delta x_k^{(i)} - \text{t}\Delta x_p^{(i)}) \quad (8)$$

式中, C_j 为一个参量, $C_j = n_j$, n 为接触单元局部坐标的单位矢量; Δ_k 为主动接触点 k 处的材料重叠矢量; t 为时间; i 为迭代次数;下标 k 和 p 分别为接触边界单元沿切向和法向的局部坐标。

求解空气弹簧接触分析的控制方程得到接触面上节点接触力。由节点接触力求出接触面单元上的当量分布力进而求出单元合力,由单元合力判断两接触表面单元的接触状态,根据接触状态判断并修正控制方程,多次迭代直至收敛,变形体与接触体为无滑移接触。

1.2 三维模型的建立

运用三维制图软件 CATIA 建立膜式空气弹簧的三维模型,由于 CATIA 和 ABAQUS 都是由达索公司开发的,因此在三维模型导入有限元软件的过程中能实现无缝导入,为后续有限元模型的建立和定义提供了便利条件。由 CATIA 建立的某型号膜式空气弹簧的三维设计模型如图 1 所示,其基本参数为:设计高度 275 mm,外直径 210 mm,子口直径 130.8 mm,额定气压 0.5 MPa,工作行程 (-120, +120) mm,负荷能力 (12.4, 29.0) kN。

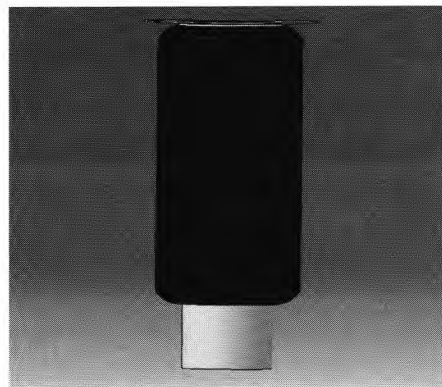


图1 膜式空气弹簧三维设计模型

1.3 有限元模型的建立

1.3.1 模型导入和单元选取

把由 CATIA 建立的三维设计模型导入到 ABAQUS 有限元软件中。选取四节点壳单元 (S4R) 和 Rebar 单元定义橡胶气囊, 选取流体单元模拟腔内气体, 选取 R3D3 和 R3D4 单元模拟上盖板与下底座。

1.3.2 网格划分

对上盖板、下底座和橡胶气囊分别进行网格划分。为得到均匀的四边形和三角形网格, 采用非独立网格划分方式。在进行扫掠网格划分时, 将囊体上下子口接触部分进行面拆分, 在拆分面上进行边界布种, 上下子口处分别布置 30 个节点, 轴线与上下子口中心定义一个节点, 径向轴线上变形相对较大的地方适当增大种子数量, 以提高计算精度。以三角形网格控制为主对上盖板和下底座划分网格。在生成 S4R, C3D3 和 C3D4 单元后, 提取出 inp 文件, 将 S4R 单元更改为 F3D4 单元; 在上下子口中心分别添加一个节点, 其与上下子口处节点形成 F3D3 单元, 并在 inp 文件中定义其流体特性。划分网格后的有限元模型如图 2 所示。

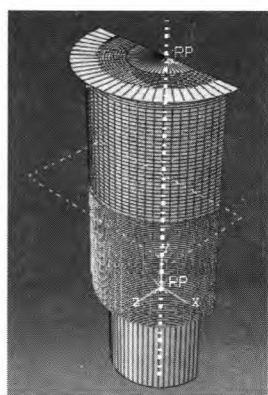


图2 空气弹簧整体有限元单元模型

1.3.3 边界条件和接触条件定义

(1) 在自定义的柱坐标系中, X 为径向、 Y 为周向、 Z 为轴向, 对空气弹簧半模型周向施加面压力载荷, 模拟充气过程。

(2) 空气弹簧囊体与上盖板、活塞的接触定义为无摩擦接触。

(3) 活塞参考点在 3 个自由度方向上施加全约束, 上盖板只施加水平位移, 上盖板参考点、活

塞参考点和囊体轴向添加对称约束。

1.3.4 求解

本研究应用 ABAQUS/Standard(通用)模块对空气弹簧进行横向特性有限元分析。在分析过程中需考虑空气弹簧的状态非线性(接触问题)、几何非线性(大变形)以及材料非线性^[6]。其非线性分析分解为 2 个载荷步。第一载荷步: 对上盖板、活塞施加全约束, 对空气弹簧囊体气体参考点施加气压载荷, 加载时间为 0~1 s 时间段。第二载荷步: 取消对上盖板的全约束, 添加一个水平方向的位移载荷, 加载时间为 1~2 s 时间段。计算过程都采用 Full Newton-Raphson 方法求解, 加载过程采用自动适应时间步长, 首步为 1/50 时间步, 其中每个载荷步又由多个载荷子步组成, 采用不平衡力 F 作为其收敛判断条件, 达到非线性分析的目的。

2 分析结果与讨论

2.1 初始内压对空气弹簧横向特性的影响

在空气弹簧设计高度位置, 对有限元模型腔内气体参考点分别设定初始内压 0.3、0.5 和 0.7 MPa, 横向位移为 50 mm, 同时设定帘线角为 30° , 帘线直径为 1×10^{-6} mm, 并且帘线网格间距为 3.5×10^{-3} mm, 两帘布层层间距离为 2 mm。通过计算分析空气弹簧活塞参考点处的位移和反作用力, 经过数据处理得到其在不同初始内压下的应力和应变分布, 如图 3 和 4 所示。囊体容积与加载时间的关系曲线如图 5 所示。

由图 5 可见: 0~1 s 加载时间内为充气过程, 空气弹簧容积逐渐增大, 使其进入工作过程; 在 1~2 s 加载时间内, 空气弹簧上盖板横向运动, 而空气弹簧整体容积近似保持不变。另外, 随着初始内压的提高, 空气弹簧的整体容积也增大。

不同初始内压下负荷与横向位移的关系曲线如图 6 所示。由图 6 可见, 空气弹簧横向刚度曲线呈非线性, 但趋于线性, 而且横向刚度值较小。另外, 随着初始内压的提高, 空气弹簧的横向刚度也增大。这与实际试验数据类似。

2.2 帘线间距对空气弹簧横向特性的影响

在设定相同的初始内压前提下, 分别设定帘线间距为 1.0×10^{-3} 、 3.5×10^{-3} 和 7.0×10^{-3}

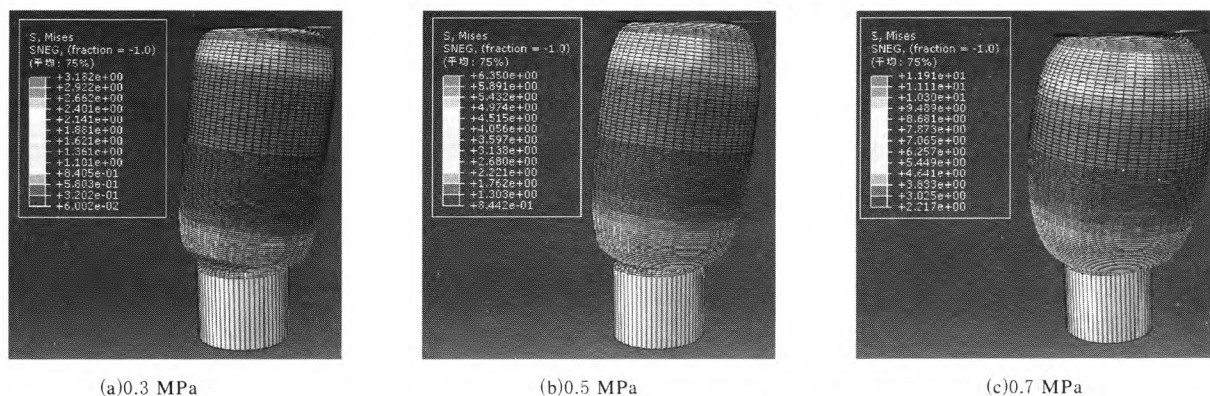


图3 不同初始内压下空气弹簧 Mises 应力分布

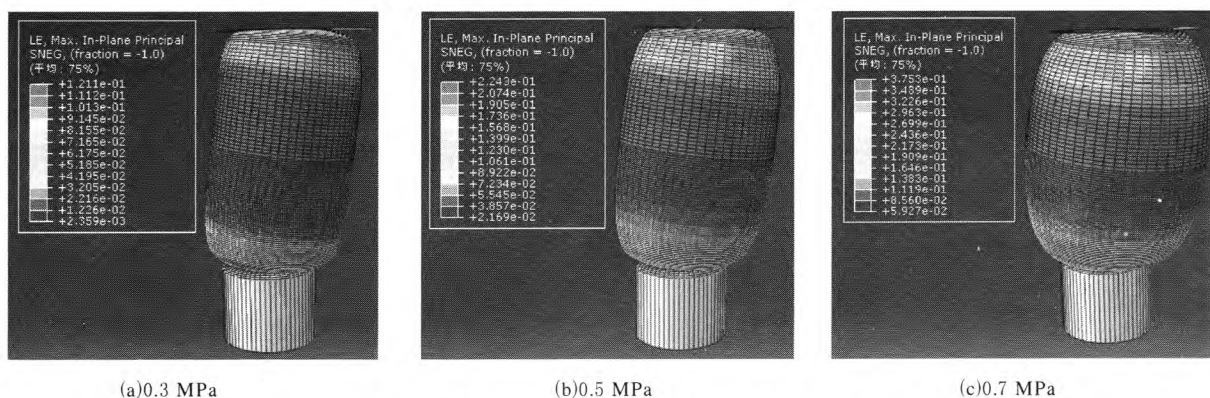
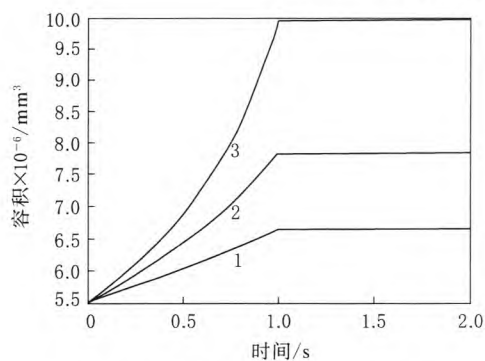


图4 不同初始内压下空气弹簧等效对数应变分布

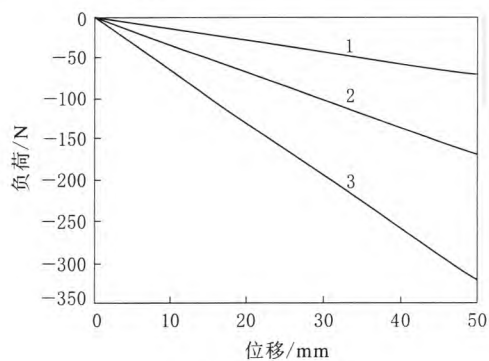


初始内压/MPa: 1—0.3; 2—0.5; 3—0.7。

图5 不同初始内压下空气弹簧囊体容积与加载时间的关系曲线

mm, 横向位移为 50 mm, 同时设定帘线角为 30° , 帘线直径为 1×10^{-6} mm, 两帘布层层间距离为 2 mm, 同样经过数据处理得到其在不同帘线间距下的应力和应变分布, 如图 7 和 8 所示, 囊体容积与加载时间的关系曲线如图 9 所示。

不同帘线间距下负荷与横向位移的关系曲线如图 10 所示。由图 10 可见, 空气弹簧横向刚度较小, 曲线趋于线性, 且随帘线间距增大而减小。



注同图 5。

图6 不同初始内压下空气弹簧负荷与横向位移的关系曲线

3 结论

(1) 选用有限元软件 ABAQUS 中的 Rebar 单元和流体单元进行仿真, 在 inp 文件中定义流体特性, 实现了膜式空气弹簧帘线与橡胶材料非线性力学特性的定义和气体实际工况的模拟。

(2) 初始内压与帘线间距之间存在相互影响的关系。为达到与空气悬架匹配的横向刚度要

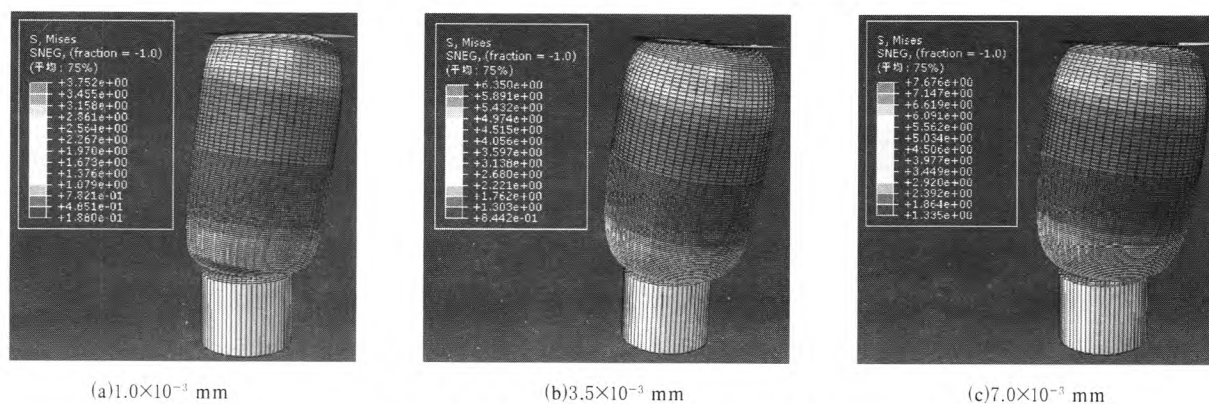


图7 不同帘线间距下空气弹簧 Mises 应力分布

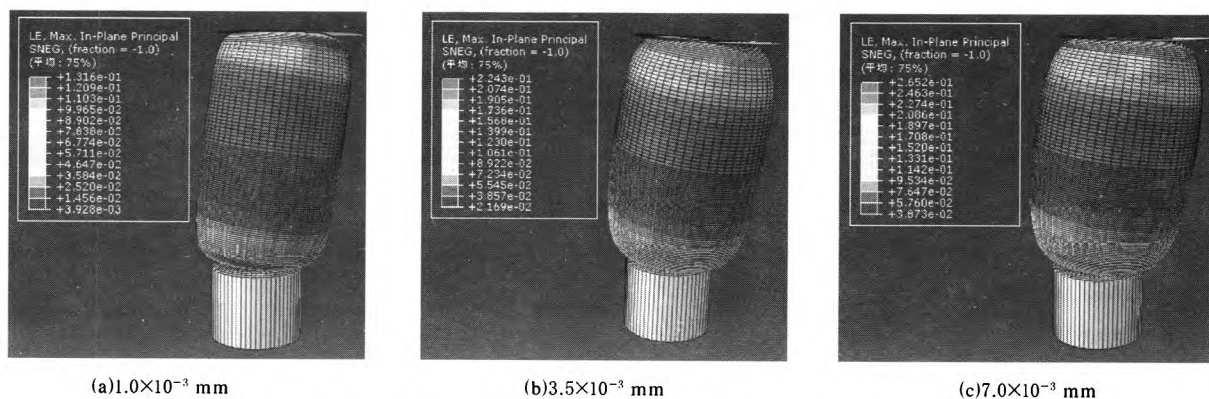


图8 不同帘线间距下空气弹簧等效对数应变分布

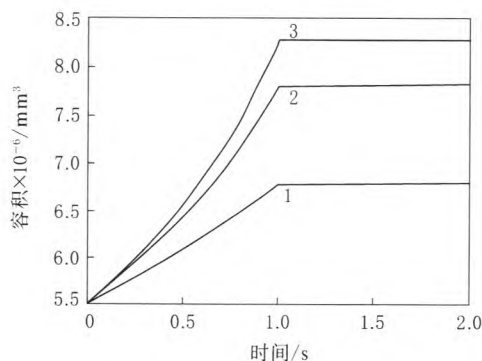
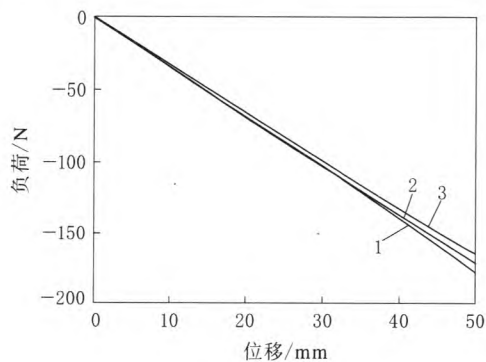
帘线间距 $\times 10^3 / \text{mm}$: 1—1.0; 2—3.5; 3—7.0。

图9 不同帘线间距下空气弹簧囊体容积与加载时间的关系曲线

求,必须合理选取膜式空气弹簧的初始内压和帘线间距参数。随着初始内压的提高,横向刚度增大,空气弹簧在最大横向位移处的应力和应变都增大,并且随着应变的增大,横向稳定性下降,有产生横向屈挠的危险;随着帘线间距增大,横向刚度反而减小。

研究初始内压和帘线间距对膜式空气弹簧横



注同图9。

图10 不同帘线间距下空气弹簧负荷与横向位移的关系曲线

向刚度特性的影响可为进一步分析初始内压、帘布层数、帘线角度和帘线间距等之间的相互影响关系提供理论基础和数据资料。

参考文献:

- [1] Jack G. Ride on Air: A History of Air Suspension[M]. New York: SAE Inc, 1999.
- [2] 赵铁才, 陶家念. 汽车悬挂用空气弹簧的设计研究[J]. 中国

- 公路学报,1992,5(3):86-92.
- [3] 郑明军,王文静,陈政南,等. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型力学性能常数的确定[J]. 橡胶工业,2003,50(8):462-465.
- [4] 郭微,钱德猛. 汽车用膜式空气弹簧的非线性有限元分析[J]. 客车技术与研究,2006(3):14-15.
- [5] 吴琳琪. 车用膜式空气弹簧垂向弹性特性有限元分析及优化[D]. 镇江:江苏大学,2010.
- [6] 庄茁. ABAQUS/Standard 有限元软件入门指南[M]. 北京:清华大学出版社,1998:67-68.

收稿日期:2012-10-28

Effect of Initial Internal Pressure and Cords Distance on Lateral Stiffness of Rolling Lobe Air Spring by Using Finite Element Analysis

ZHANG Jun-ling, WANG Hao-yu

(Guizhou Industry Polytechnic College, Guiyang 550000, China)

Abstract: The finite element model of rolling lobe air spring was established by ABAQUS analysis software, the load-lateral displacement curves were obtained through the simulation and the influence of initial internal pressure and cords distance on the lateral stiffness of rolling lobe air spring was studied. The results showed that, with the increase of initial pressure, the lateral stiffness of the air spring increased, while the increase of the cords distance caused by the air spring expansion reduced the lateral stiffness. This study provided references for the design of internal pressure and cords distance during air spring design.

Key words: air spring; initial pressure; cords distance; lateral stiffness; finite element analysis

2018 年全球丁苯橡胶需求将达 675 万 t

中图分类号:TQ333.1;F416.7 文献标志码:D

根据“透明度市场研究”新发布的一份市场报告《2012 至 2018 年 SBR 市场——全球行业分析、规模、份额、增长与预测》,2011 年全球丁苯橡胶(SBR)需求为 460 万 t,预计 2012—2018 年将以 5.7%的复合年增长率攀升,到 2018 年将达到 675.48 万 t。2011 年 SBR 市场估值为 113 亿美元,预计 2012—2018 年将以 7.1%的复合年增长率攀升,到 2018 年将达到 189 亿美元。

SBR 占全球合成橡胶消费量的 45%,其需求增长主要受轮胎制造业需求增长的推动。轮胎制造业是 SBR 最大的单一应用部门,其消费量占全球 SBR 产量的 75%以上,但原材料(特别是丁二烯)价格的波动一直是制约该市场发展的主要障碍。

该报告分析并估计了 2012—2018 年 SBR 的全球需求,包含了推动因素和限制因素对 SBR 市场的影响以及未来的机会。此外,报告还对原材料及其对 SBR 需求和价格的影响进行了详细分

析。通过研究当前和未来的市场情况,分析并预估了其中每个部门的发展。预测了北美、欧洲、亚太和世界其他地区的需求。该报告还提供了中国、印度、巴西、日本、德国和美国各应用领域的 SBR 消费量以及该预测期的消费量估计值。

[摘自《信息早报》(化工专刊),2013-03-05]

一种硅藻土/天然橡胶复合材料的制备方法

中图分类号:TQ332.5 文献标志码:D

由中国热带农业科学院农产品加工研究所申请的专利(公开号 CN 101914229A,公开日期 2010-12-15)“一种硅藻土/天然橡胶复合材料的制备方法”,提供了一种硅藻土/天然橡胶复合材料的制备方法:先将以硅烷偶联剂进行改性的硅藻土用去离子水分散,加入天然胶乳中,然后加入作为表面改性剂的环氧化天然胶乳,继续搅拌,加凝固剂凝固,干燥制得硅藻土/天然橡胶复合材料。该发明工艺简单,易于规模化生产,产品可以用于制备医用天然胶乳制品。

(本刊编辑部 赵 敏)