

应用理论

乘用车尾门密封条的压缩仿真分析

王春伟, 郑明贵, 操 芹, 张景煌, 王若满, 胡 晋
(东风汽车集团有限公司技术中心 架构开发中心, 湖北 武汉 430058)

摘要: 先对乘用车尾门密封条三元乙丙橡胶密实胶和海绵胶进行力学性能试验, 确定2种材料的本构模型, 然后采用Abaqus有限元分析软件对尾门密封条的压缩过程进行仿真分析。结果表明: 尾门密封条的海绵胶泡管应力、应变和应变能均较大, 海绵胶与密实胶接触部位有较大的应变和应变能; 尾门密封条的仿真与试验压缩力-压缩量曲线拟合良好, 试验压缩力平均误差不超过10%, 仿真与试验结果一致性好。

关键词: 尾门密封条; 仿真分析; 力学性能试验; 压缩试验; 压缩力

中图分类号: TQ336.4⁺2; O241.82

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2022)01-0023-05

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2022.01.0023



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

尾门密封条作为汽车密封系统中重要的密封部件, 不仅可以使车身的室内与室外隔离, 起到防风、防尘、隔声和隔热的作用, 而且还可以减少尾门在关闭过程中受到的冲击以及在汽车行驶过程中受到的振动^[1]。

国内外通常使用Abaqus等有限元分析软件对汽车密封条的结构进行优化设计, 且已取得一些成果^[2]。D. A. WAGNER等^[3]采用Abaqus有限元分析软件对影响汽车密封性能的因素进行分析, 获得了密封条的受力变形曲线。冯海星等^[4]发现压缩负荷在密封条内部产生的应力等因素对密封条的隔声性能有一定的影响。张军等^[5]基于缓冲橡胶块的试验数据, 选用Mooney-Rivlin本构模型, 并结合有限元仿真技术和优化算法的反求方法来确定橡胶材料参数, 结果表明通过该方法确定的材料参数能较准确地描述缓冲橡胶块的材料特性。

本工作先对乘用车尾门密封条的橡胶材料进行力学性能试验以确定其本构模型, 再采用Abaqus有限元分析软件对尾门密封条的压缩过程

进行仿真分析, 展示了有限元仿真分析可辅助尾门密封条的结构设计及优化。

1 橡胶材料的力学性能试验及本构模型

1.1 力学性能试验

橡胶材料的非线性对尾门密封条的结构稳定性存在一定的影响^[6], 因此本工作对三元乙丙橡胶密实胶和海绵胶的力学性能进行试验^[7-8]。

为使拟合结果精度更高、准确性更好, 本工作对密实胶进行了多轴拉伸试验^[9], 并通过传感器反馈应变大小。密实胶的多轴拉伸试验装置如图1所示。

1.2 本构模型

金属材料通过几个参数即可反映其力学性能, 但对于橡胶材料, 其力学性能较为复杂, 需要通过非线性的本构关系进行描述。橡胶材料的体积近似不可压缩, 其应力-应变关系属于非线性关系, 不能通过弹性模量(E)、泊松比(ν)及密度(ρ)等表示, 而是通过应变能密度函数表示^[10]。

作者简介: 王春伟(1991—), 男, 山东烟台人, 东风汽车集团有限公司技术中心工程师, 硕士, 主要从事汽车车身零部件结构及空调流体的仿真分析。

E-mail: wh1152410466@163.com

引用本文: 王春伟, 郑明贵, 操芹, 等. 乘用车尾门密封条的压缩仿真分析[J]. 橡胶工业, 2022, 69(1): 23-27.

Citation: WANG Chunwei, ZHENG Minggui, CAO Qin, et al. Compression simulation analysis of tailgate sealing strip for passenger cars[J]. China Rubber Industry, 2022, 69(1): 23-27.



图1 多轴拉伸试验装置

Fig. 1 Multiaxial tensile test device

1.2.1 密实胶

密实胶是一种大变形、高度不可压缩的非线性超弹性材料。Abaqus有限元分析软件提供了多种非线性超弹性材料的应变能密度函数形式^[11-12], 其中常用的为Arruda-Boyce, Mooney-Rivlin, Neo-Hookean, Yeoh, Ogden和Van der Waal本构模型。这6种应变能密度函数的变量参数可以通过非线性超弹性材料的单轴拉伸、纯剪切、多轴拉伸的试验数据来确定。

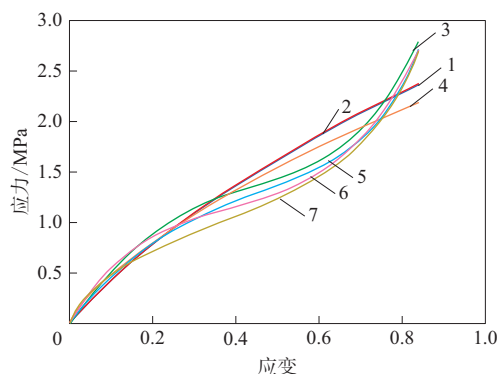
本工作先对密实胶的多组单轴拉伸试验数据进行最小二乘法拟合, 以获得密实胶的试验应力-应变曲线。

其次, 通过对比不同应变能密度函数与试验应力-应变曲线间的差异(见图2), 选取密实胶的本构模型(见图2)。从图2可以看出, 密实胶的Ogden本构模型($N=3$)及Van der Waal本构模型与试验应力-应变曲线间的差异较小。

最后, 对比试验应力-应变曲线与Ogden本构模型($N=3$)和Van der Waal本构模型曲线对应数据的均方根误差大小, 分别为3.20%和18.34%, 最终选取Ogden本构模型($N=3$)作为密实胶的本构模型。

1.2.2 海绵胶

海绵胶是一种大变形、高度可压缩的非线性弹性材料, 其变形主要包含材料自身的变形和发泡孔隙的变形。在Abaqus有限元分析软件中, HyperFoam本构模型是反映海绵胶力学性能最合适的应变能密度函数^[1]。



1—Arruda-Boyce; 2—Neo-Hookean; 3—Yeoh; 4—Mooney-Rivlin; 5—Ogden ($N=3$); 6—Van der Waal; 7—试验。

图2 密实胶的应变能密度函数与试验应力-应变曲线对比

Fig. 2 Comparison of strain energy density function and test stress-strain curves of dense compound

$$U = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left\{ \lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} [(J^{el})^{-\alpha_i \beta_i} - 1] \right\}$$

式中: U 为单位体积的应变能; μ_i , α_i 和 β_i 均为与温度有关的材料常数, 由单轴拉伸、单轴压缩、简单剪切、体积压缩的试验数据来确定; λ_1 , λ_2 和 λ_3 为主伸长比。

2 尾门密封条的压缩试验过程及压缩仿真

2.1 压缩试验过程

压缩试验装置如图3所示。试验前, 需对室内环境、传感器及计算机的控制程序等进行检查, 校正下方弹簧的一致性, 避免试验过程中因偶然因素导致的客观误差。

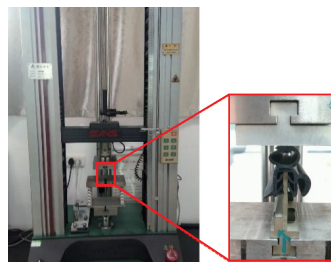


图3 尾门密封条的压缩试验装置

Fig. 3 Compression test device for tailgate sealing strip

尾门密封条的压缩试验装置安装有多组力及位移传感器, 其压缩过程及速率等均由计算机程序控制。模拟尾门内板的上工装安装在工作台上, 以保证压缩的水平与准确; 模拟尾门密封条的下工装固定在侧围止口上。在压缩试验过程中, 上工装以 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速率沿垂直方向进行加载,

以模拟尾门在关闭过程中的运动状态,此次加载可认定为准静态过程。

2.2 压缩仿真

为准确地对尾门密封条压缩过程进行有限元分析,参照压缩试验及真实变形设置其仿真分析的网格大小及属性、接触、边界及负荷等,如图4所示。



图4 尾门密封条的压缩仿真边界及加载

Fig. 4 Compression simulation boundary and loading of tailgate sealing strip

结合相关资料与文献^[13],对于压缩变形工况,尾门密封条的长度方向尺寸较截面尺寸大很多,尾门密封条主要沿垂直方向受压缩力作用,在另外的方向受摩擦力作用,其长度方向的受力是一致的,受到的重力也是相同的。故尾门密封条的仿真分析可简化为二维仿真问题,这样不仅减小了网格数量,也缩短了计算时长,从而提升更新迭代的效率。

当与尾门接触时,尾门密封条的压缩负荷与变形均在尾门运动过程中产生,一般通过施加位移负荷来实现。

3 结果与讨论

3.1 仿真云图分析

在尾门密封条的仿真压缩过程中,其应力云图如图5所示。从图5可以看出:在尾门对尾门密封条的压缩过程中,尾门密封条逐渐产生压缩变形,海绵胶泡管位置产生滑移,尾门密封条明显处于应力分布不均匀的状态;当尾门与尾门密封条的表面相互作用产生压缩力时,泡管与尾门的接触面积逐渐增大,应力主要集中于泡管,而泡管变形较大的区域,其应力明显较大且集中;在密实胶的区域,基本无应力产生,而金属骨架则承受较大的应力。

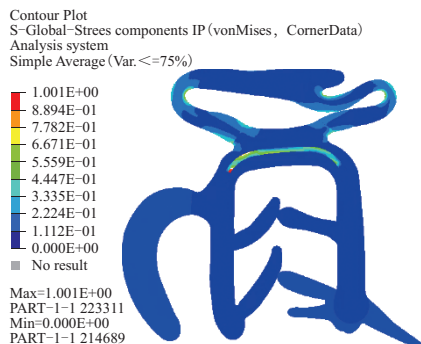


图5 尾门密封条的应力云图

Fig. 5 Stress nephogram of tailgate sealing strip

在尾门密封条的仿真压缩过程中,其应变云图如图6所示。从图6可以看出,在尾门对尾门密封条的压缩过程中,尾门密封条的海绵胶泡管位置发生明显的压缩变形,应变主要集中于2个区域:第1个区域为靠近与密实胶接触的海绵胶部位,其原因是海绵胶属于高度非线性弹性材料,密实胶属于非线性超弹性材料,在同等作用的条件下,海绵胶的压缩量明显大于密实胶的压缩量;第2个区域为泡管变形较大的部位,该区域主要发生弹性变形,其压缩量较大,故此位置有较大的应变。

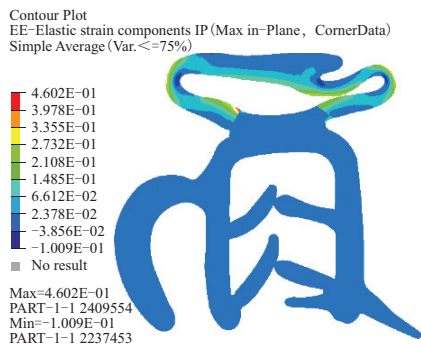


图6 尾门密封条的应变云图

Fig. 6 Strain nephogram of tailgate sealing strip

此外,当尾门密封条的压缩量超出一定范围后,海绵胶泡管发生一定程度的反凹,尾门与尾门密封条的接触面积也发生一定的变化。

根据能量守恒原理,在尾门密封条压缩过程中,压缩力所作的功等于尾门密封条变形时的动能、热能和应变能3部分之和。在本工作尾门密封条的压缩过程中,主要施加的是位移负荷,且加载速度变化缓慢,此时可不计动能并忽略热能,故可认为压缩力所作的功等于尾门密封条变形时的应变能。

在尾门密封条的仿真压缩过程中,其应变能

云图如图7所示。从图5—7可以看出,应变能较大的位置与应力和应变最大的位置基本一致,说明压缩力所作的功主要导致海绵胶泡管变形,对于其他区域的影响并不大。

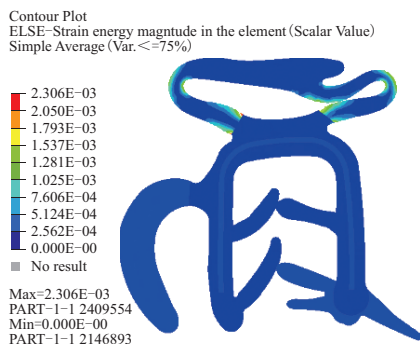


图7 尾门密封条的应变能云图

Fig. 7 Strain energy nephogram of tailgate sealing strip

3.2 压缩力分析

尾门密封条的仿真与试验压缩力-压缩量曲线对比如图8所示。

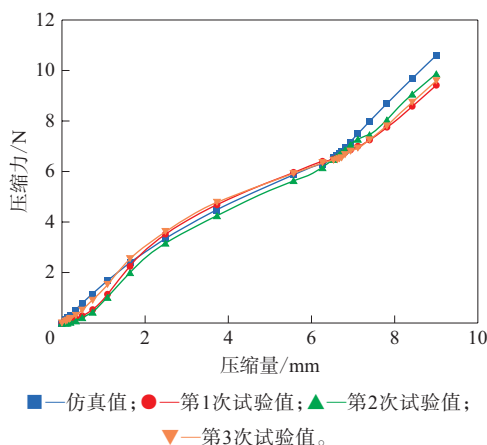


图8 尾门密封条的仿真与试验压缩力-压缩量曲线对比
Fig. 8 Comparison of simulation and test compression force-compression amount curves of tailgate sealing strips

从图8可以看出:在压缩量不超过理论设计值(即6.5 mm)^[1]时,仿真与试验压缩力-压缩量曲线变化趋势基本一致,仿真曲线拟合性较好;在压缩量超过理论设计值时,仿真与试验曲线的压缩力差异略有增大,分析其原因为在尾门密封条处于过压状态时,尾门密封条的接触位置逐渐产生反凹,接触面积逐渐减小,导致压缩力增大较快。

尾门密封条的试验压缩力误差曲线如图9所示。压缩力误差(ϵ)的计算公式为 $\epsilon = (F_e - F_s) / F_s$,

式中 F_e 为试验压缩力, F_s 为仿真压缩力。

从图9可以看出:在压缩量不超过理论设计值时,随着压缩量的增大,试验压缩力误差逐渐减小,仿真与试验结果拟合越来越好;在压缩量超过理论设计值时,随着压缩量的增大,试验压缩力误差逐渐增大,最后趋于稳定。

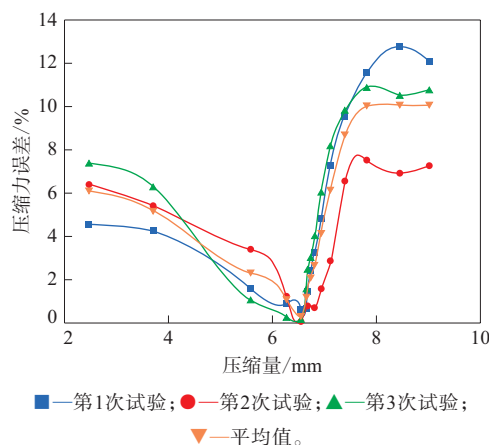


图9 尾门密封条的试验压缩力误差曲线

Fig. 9 Test compression force error curves of tailgate sealing strips

尾门密封条3次试验压缩力误差均不超过13%,而平均误差不超过10%。分析认为,在实际工况中尾门密封条海绵胶上有排气孔等因素的影响,因此导致其仿真与试验结果有一定差异。

4 结论

通过对尾门密封条海绵胶和密实胶的力学性能试验,确定了两种材料的本构模型,结合具体试验过程,对尾门密封条的压缩过程进行仿真分析。

(1)对仿真云图分析得出,尾门密封条的海绵胶泡管应力、应变和应变能均较大,海绵胶与密实胶接触部位有较大的应变及应变能。

(2)对比仿真与试验结果发现,在压缩量不超过理论设计值时,尾门密封条的仿真与试验结果拟合较好,试验压缩力误差较小;在压缩量超过理论设计值时,试验压缩力误差逐渐加大,最后趋于稳定。但尾门密封条的试验压缩力平均误差不超过10%,即仿真与试验结果一致性好。

(3)尾门密封条的后期设计时可以根据应力、应变和应变能云图对其结构进行适当改进,以减少应力和应变集中,并应用仿真分析对结构进行

验证,以保证尾门密封条的使用性能。

参考文献:

- [1] 张杰. 基于有限元仿真的汽车尾门密封条结构分析[J]. 橡胶科技, 2019, 17(11): 612-615.
ZHANG J. Structural analysis of automotive tailgate sealing strip based on finite element simulation[J]. Rubber Science and Technology, 2019, 17(11): 612-615.
- [2] 吴志刚, 何锋. 汽车密封条挤出成型影响因素分析[J]. 橡胶工业, 2017, 64(6): 363-366.
WU Z G, HE F. Analysis of influencing factors of automobile sealing strip extrusion[J]. China Rubber Industry, 2017, 64(6): 363-366.
- [3] WAGNER D A, MORMAN K N, GUR Y, et al. Nonlinear analysis of automotive door weatherstrip seals[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1997, 28(1): 33-50.
- [4] 冯海星, 高云凯. 考虑压缩负荷的密封条传递损失分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 97-102.
FENG H X, GAO Y K. Transmission loss analysis of seal based on a consideration of compression load[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(1): 97-102.
- [5] 张军, 成艾国, 宋凯, 等. 基于移动最小二乘响应面法的橡胶材料参数反求[J]. 汽车工程, 2011, 33(3): 271-275.
ZHANG J, CHENG A G, SONG K, et al. Inverse determination of rubber material parameters based on moving least square response surface method[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(3): 271-275.
- [6] 蔡增伟, 戴元坎, 陈于文, 等. 轿车行李箱密封条起皱问题的CAE分析及优化[J]. 上海汽车, 2001(8): 19-20.
CAI Z W, DAI Y K, CHEN Y W, et al. CAE analysis and optimum of the corrugation problem in the car trunk sealing strip[J]. Shanghai Auto, 2001(8): 19-20.
- [7] 付治存. 有限元技术在汽车密封条结构优化设计中的应用[J]. 汽车零部件, 2015(11): 27-32.
FU Z C. Application of FEM in the optimization design of automobile seal[J]. Automobile Parts, 2015(11): 27-32.
- [8] 王海军, 谷洲平. 三元乙丙橡胶海绵车门密封条压缩变形的仿真分析与试验验证[J]. 橡胶工业, 2018, 65(7): 814-817.
WANG H J, GU Z P. Simulation analysis and test verification on compression deformation of EPDM sponge auto weatherstrip[J]. China Rubber Industry, 2018, 65(7): 814-817.
- [9] 赵健, 宫建国, 金涛, 等. CAE技术在汽车密封件设计中的应用[J]. 汽车技术, 2012(12): 34-39.
ZHAO J, GONG J G, JIN T, et al. The application of CAE technique in the design of automotive weatherstrip seals[J]. Automobile Technology, 2012(12): 34-39.
- [10] 赵建才, 万德安, 何珊. 轿车车门密封条压缩变形的计算机仿真[J]. 计算机仿真, 2002, 19(3): 82-84.
ZHAO J C, WAN D A, HE S. Computer simulation of compression deformation for automotive door weatherstrip seals[J]. Computer Simulation, 2002, 19(3): 82-84.
- [11] 付治存. ANSYS有限元技术在汽车密封条设计中的应用[J]. 汽车工程师, 2017(3): 24-26.
FU Z C. Application of finite element analysis based on ANSYS in design of vehicle seal strip[J]. Auto Engineer, 2017(3): 24-26.
- [12] MOON H I, KIM H, KIM S B, et al. Predicted minimum door-closing velocity based on a three-dimensional door-closing simulation[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2011, 47(3): 296-306.
- [13] 马天兵, 周青, 蒋明明, 等. 车门密封条压缩力的仿真与实验研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2019, 39(2): 18-21.
MA T B, ZHOU Q, JIANG M M, et al. Simulation and experimental study on the compression force for the door seal[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 39(2): 18-21.

收稿日期: 2021-07-05

Compression Simulation Analysis of Tailgate Sealing Strip for Passenger Cars

WANG Chunwei, ZHENG Mingui, CAO Qin, ZHANG Jinghuang, WANG Ruoman, HU Jin

(Dongfeng Motor Corporation Technical Center, Wuhan 430058, China)

Abstract: Firstly, the mechanical performance tests of ethylene-propylene-diene rubber dense compound and sponge compound of tailgate sealing strip for passenger car were carried out, the constitutive models of two materials were determined, and then the compression process of the tailgate sealing strip was simulated and analyzed by the finite element analysis software Abaqus. The results showed that the stress, strain and strain energy of the sponge tube of the tailgate sealing strip were relatively high, and the strain and strain energy in the contact part of the sponge compound and dense compound were also high. The relationship curve between the compression force and compression amount of the tailgate sealing strip obtained by simulation analysis fitted well with the experimental results, the average error of the test compression force was within 10%, and the simulation and test results were in good agreement.

Key words: tailgate sealing strip; simulation analysis; mechanical performance test; compression test; compression force