产品・设计

汽车门框密封条压缩的仿真分析

郑明贵,王春伟,操 芹,董 颖,江想莲,杨 飘,张景煌 (东风汽车集团有限公司 技术中心,湖北 武汉 430058)

摘要:运用非线性有限元方法对汽车门框密封条压缩进行仿真分析,对3种仿真模型与试验汽车门框密封条的断面 压缩变形和压缩力进行对比。结果表明:汽车门框密封条的压缩力主要由泡管的变形产生,钳口卡爪变形对压缩力有一 定的影响,但影响较小;泡管内外表面包覆层密实胶与内部海绵胶性能的差异对压缩力有较大影响,建模时应加以考虑, 以提高仿真分析精度。

关键词:汽车门框密封条;压缩力;断面变形;有限元分析 中图分类号:TQ336.4⁺2;O241.82 文献标志码:A

汽车门框密封条性能对整车驾乘舒适性有 重要的影响^[1-2]。汽车门框密封条能防止雨水进 入车舱,降低外界传入车舱的噪声(尤其是高速 风噪声),给驾乘者提供干燥、安静和舒适的环 境,同时车门密封条提供合适的关门力,提升关 门手感和声音品质^[3-6]。因此,在整车开发中有必 要对汽车门框密封条进行分析研究,以预测、改 进其性能,从而提高整车的驾乘舒适性。

近年来,国外学者对汽车门框密封条进行 了大量研究。福特汽车公司的A.W. DAVID等^[7] 通过非线性有限元方法对车门密封条进行了关 门压缩和高速失效仿真分析,得出汽车关门力的 35%~50%用于克服车门密封条变形产生的阻 力,汽车高速行驶时车舱内外压力差会造成车门 密封条过度压缩而与车身钣金接触面分离,从而 产生高速失效。M. KENA等^[8]研究了车门密封 条对汽车关门效果的影响,发现通过调整车门不 同位置的密封间隙能有效改善关门品质。国内 学者也对汽车门框密封条的性能进行了大量研 究,如运用有限元三维仿真软件对汽车门框密封 文章编号:1000-890X(2021)05-0363-06 DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2021.05.0363



条弯曲失效进行分析研究^[9]。王海军等^[10]采用有限元分析与试验对照的方法研究了多种车门密封条断面在压缩过程中的压缩变形和压缩力。 张杰^[11]在汽车尾门密封设计中运用Marc软件对 尾门密封条进行结构分析和优化,使其压缩负荷 达到设计要求。

本工作针对汽车门框密封条正向压缩,考虑 门框密封条在变形过程中钳口卡爪变形及其泡管 内外包覆层的影响,建立了3种有限元模型,采用 非线性有限元分析软件Abaqus对门框密封条的 压缩变形和压缩力进行了仿真分析,并将仿真与 试验结果进行对比,以验证仿真分析的有效性和 甄别压缩力的影响因素。

1 汽车门框密封条正向压缩试验

根据QCT 710—2004《汽车门框密封条压缩 负荷试验方法》对汽车门框密封条进行正向压缩 试验。从密封条成品上截取长度为100 mm的样 件,其按标准进行处理后,在压缩负荷检验设备 上进行正向压缩试验(见图1)。试验加载速度为

作者简介:郑明贵(1984—),男,江西上饶人,东风汽车集团有限公司工程师,硕士,主要从事汽车研发仿真分析工作。 E-mail;zhengmg@dfmc.com.cn

引用本文:郑明贵,王春伟,操芹,等. 汽车门框密封条压缩的仿真分析[J]. 橡胶工业, 2021, 68 (5): 363-368.

Citation: ZHENG Minggui, WANG Chunwei, CAO Qin, et al. Simulation analysis on compression of automobile doorframe sealing strip[J]. China Rubber Industry, 2021, 68 (5): 363-368.



图1 汽车门框密封条正向压缩试验 Fig.1 Forward compression test for automobile doorframe sealing strip

0.5 mm • s⁻¹, 近似准静态过程进行加载, 试验设备 测试精度为0.01 N。

2 汽车门框密封条模型

2.1 断面模型

汽车门框密封条的轴向尺寸远大于断面尺 寸,且在正向压缩时沿轴向所受的面力和体力的 大小和方向均不变,变形也主要发生在垂直于轴 向的平面内,沿轴向的变形量很小。因此可将门 框密封条正向压缩模型简化为平面应变二维模 型,以减小计算量。

门框密封条的材料组成为海绵胶、密实胶和 金属骨架(见图2)。上部泡管材料主要是海绵胶, 具有可压缩性;下部钳口材料主要是密实胶,其为 超弹性不可压缩材料;中间金属骨架为钢材。由 于密实胶为超弹性材料,钢为一般弹塑性材料,因 此建立模型时海绵胶和密实胶部分采用平面应变 杂交单元划分网格,金属骨架部分采用平面应变 单元划分网格。

根据门框密封条断面材料建立3种仿真模型 (见图2):普通模型、插入-压缩模型和包覆层模 型,各模型网格平均尺寸均为0.2 mm,而泡管材料 和边界条件有区别。普通模型将泡管材料全部设 为海绵胶,边界条件设为钢骨架全约束和位移加 载。插入-压缩模型的上述条件与普通模型一致, 但考虑压缩过程中钳口卡爪变形的影响,其分析 过程分2步进行:第1步约束断面左侧,将支撑板件 插入门框密封条钳口;第2步释放约束,进行压缩 分析。包覆层模型考虑了门框密封条泡管内外表 面包覆层的作用。门框密封条泡管在生产过程中 由于热融化和涂层的作用会在内外表面形成厚度



密封条压缩力有一定的影响。3种模型的门框钣 金均定义为解释刚体,插入-压缩模型的插入块也 定义为解释刚体。

2.2 材料本构模型及参数

门框密封条泡管的可压缩海绵胶采用

R.W. OGDEN^[13]提出的基于应变能密度函数表征 的Hyperfoam材料本构模型来描述,其本构方程如下:

$$U = \sum_{i=1}^{N} \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left\{ \bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} [(J_e)^{-\alpha_i \beta_i} - 1] \right\}$$
(1)

$$J_{t} = (1 + \varepsilon_{t})^{3}$$
⁽²⁾

$$\lambda_i = J_t^{-\frac{1}{3}} \lambda_i \tag{3}$$

$$J_{\rm e} = \frac{J}{J_{\rm t}} \tag{4}$$

式中:U为应变能;N为阶数,取3; λ_i (i=1,2,3)为 主伸长率; λ_i 为偏伸长率; μ_i , α_i 和 β_i 均为与温度相 关的材料参数,其值通过海绵胶的单轴、双轴、平 面、体积的拉伸或压缩试验来确定;J为温度体积 比;J。为弹性体积比;J为总的体积比;ε,为温度引起 的应变。本工作三元乙丙橡胶(EPDM)海绵胶的 Hyperfoam材料本构模型参数如表1所示。

表1 EPDM海绵胶的Hyperfoam材料本构模型参数 Tab. 1 Hyperfoam material constitutive model parameters of EPDM sponge compound

参数	数值	参数	数值	参数	数值			
μ_1	0.670	α1	-0.960	β_1	0.008			
μ_2	0.260	α2	4.110	β_2	0.064			
μ_3	-0.430	α3	0.730	β_3	0.005			

钳口密实胶为超弹性不可压缩材料,采用 R.W.OGDEN^[14]提出的基于应变能密度函数表征 的Hyperelastic材料本构模型描述其在压缩变形中 的力学行为,其本构方程如下:

$$U = \sum_{i=1}^{N} \frac{2\mu_{i}}{\alpha_{i}^{2}} (\bar{\lambda}_{1}^{\alpha_{i}} + \bar{\lambda}_{2}^{\alpha_{i}} + \bar{\lambda}_{5}^{\alpha_{i}} - 3) + \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\beta_{i}} (J_{e} - 1)^{2i}$$
(5)
$$\bar{\lambda}_{i} = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_{i}$$
(6)

$$\lambda_i$$
 (6)

本工作EPDM密实胶的Hyperelastic材料本构 模型参数如表2所示。

2.3 摩擦模型

在车门关闭过程中和关闭状态下,门框密封 条与门框钣金之间、门框密封条自身不同面之间 会相互接触,产生摩擦作用。摩擦作用对门框密 封条的压缩变形和压缩力都有影响,因此需要建

表2 EPDM密实胶的Hyperelastic材料本构模型参数 Tab. 2 Hyperfoam material constitutive model parameters of **EPDM** dense compound

			1		
参数	数值	参数	数值	参数	数值
μ_1	7.580	α1	-1.420	β_1	0
μ_2	0.0012	α2	16.57	β_2	0
μ_3	-6.050	α3	-1.79	β_3	0

立合理的摩擦模型,以精确模拟压缩中的接触摩 擦作用。摩擦模型有库仑摩擦模型、剪切摩擦模 型和粘性摩擦模型,本工作采用修正的库仑摩擦 模型,其方程[15]如下(上式在粘结区使用,下式在 滑动区使用):

$$\tau_{\rm f} = \begin{cases} \gamma \sigma_{\rm n} & \gamma \sigma_{\rm n} < \tau_{\rm max} \\ \tau_{\rm max} & \gamma \sigma_{\rm n} \ge \tau_{\rm max} \end{cases} \tag{7}$$

式中:r_f为摩擦力;r_{max}为最大静摩擦力;y为滑动摩 擦因数,为0.5;σ,为正压力。

3 汽车门框密封条仿真与试验结果对比

仿真与试验结果对比可验证仿真分析的有效 性,识别出对分析结果影响较大的因素,提升仿真 分析精度。

3.1 断面变形对比

车门关闭状态下,门框密封条与钣金之间存 在欠压(压缩量为2 mm)、正压(压缩量为4 mm)和 过压(压缩量为6 mm)3种状态,门框密封条的断面 变形如图3所示。从图3可以看出:在欠压和正压 状态下,仿真和试验门框密封条与门框钣金之间 均只有1个接触区域;在过压状态下,仿真和试验 门框密封条与门框钣金接触界面的中间部位出现 轻微的分离现象,变成2个接触区,这是由于在过 压状态下泡管中间部分塌陷所致。3种压缩状态 下仿真与试验门框密封条的断面变形基本吻合, 门框密封条与门框钣金的接触区域和接触宽度也 基本一致。仿真分析对门框密封条的正向压缩变 形模拟具有较好的预测性。

3.2 压缩力对比

仿真与试验汽车门框密封条的压缩力-压缩 量曲线如图4所示。初始接触阶段由于接触不稳 定,仿真与试验门框密封条的压缩力-压缩量曲线 变化趋势差异较大,进入稳定压缩状态之后,仿真 与试验门框密封条的曲线变化趋势基本一致。

从图4可以看出:与试验的压缩力-压缩量曲 线相比,普通模型门框密封条的压缩力-压缩量曲 线相差最大,其次为插入-压缩模型门框密封条, 最接近的是包覆层模型门框密封条:从普通模型 与插入-压缩模型门框密封条的压缩力-压缩量曲 线对比可知,在压缩过程中钳口卡爪的变形对压缩 力有一定的影响,但影响相对较小,这表明门框密



上图为试验门框密封条断面,下图为对应仿真普通模型门框密封条断面。

图3 3种压缩状态下仿真与试验门框密封条的断面变形对比 Fig. 3 Comparison of cross section deformations of simulation and test doorframe sealing strips under three compressions states





封条的压缩力主要来自泡管部分的压缩变形;从包 覆层模型与普通模型门框密封条的压缩力-压缩 量曲线对比可知,泡管内外表面包覆层的作用使 压缩力明显增大,这是由于包覆层材料为密实胶, 具有不可压缩性,产生了较大的反力所致。综上可 知,包覆层模型具有较高的分析精度。

在3种压缩状态下仿真与试验门框密封条的 压缩力如图5所示,仿真门框密封条的压缩力误差 如图6所示。其中,压缩力误差(ω)定义如下:

$$\omega = \frac{\left|f_{\rm s} - f_{\rm e}\right|}{f_{\rm e}} \times 100\% \tag{8}$$

式中,*f*。为仿真门框密封条的压缩力,*f*。为试验门框密封条的压缩力。

从图5可以看出,3种压缩状态下仿真与试验 门框密封条的压缩力变化趋势基本一致,包覆层





图5 3种压缩状态下仿真与试验门框密封条的压缩力

Fig. 5 Compression forces of simulation and test doorframe sealing strips under three compression states



模型门框密封条的压缩力变化趋势几乎与试验门 框密封条相同,且压缩力最接近试验门框密封条。

从图6可以看出:普通模型门框密封条的压 缩力误差最大,在欠压状态下达到25.46%,在正 压和过压状态下普通模型门框密封条的压缩量 增大,压缩力也增大,压缩力绝对误差变化较小, 误差减小;插入-压缩模型门框密封条的压缩力 误差较普通模型门框密封条略小,表明压缩过程 中钳口卡爪变形对压缩力有一定的影响,但影响 较小,门框密封条的压缩力主要由泡管变形产 生;包覆层模型门框密封条的压缩力误差最小, 在欠压状态下为4.16%,在正压和过压状态下包 覆层模型门框密封条的压缩量增大,压缩量的增 大,误差减小。

图5和6的结果进一步表明门框密封条仿真模型建立时考虑泡管包覆层材料与内部材料的差异 是必要的,对仿真分析精度有较大的提升。

3种仿真模型门框密封条泡管正压状态下 Mises应力分布如图7所示。普通模型和插入-压 缩模型门框密封条泡管最大Mises应力及其分布基 本一致,与包覆层模型门框密封条有较大区别。 包覆层模型门框密封条泡管的最大Mises应力出现 在右上部弯曲处的包覆层上,整个泡管内部应力 相对于包覆层应力小很多,这表明压缩过程中泡 管包覆层的不可压缩性使其变形相对于内部材料 更为困难,从而使压缩力增大。

综上可知,运用非线性有限元方法对门框 密封条正向压缩进行仿真分析,具有较好的预测



图7 3种仿真模型门框密封条泡管正压状态下 Mises应力分布

Fig.7 Mises stress distributions of three simulation model doorframe sealing strip bubble tubes under forward pressure 作用。

4 结论

(1)汽车门框密封条正向压缩非线性有限元 分析结果与试验结果具有较好的一致性,非线性 有限元方法对门框密封条的正向压缩分析具有较 好的预测作用。

(2)汽车门框密封条压缩力主要来自泡管的 变形,钳口卡爪的变形对压缩力有一定的影响,但 影响较小;泡管内外表面密实胶包覆层的作用使 压缩力显著增大。

(3) 对汽车门框密封条正向压缩进行仿真建 模,可以忽略泡管以下部分的影响,以减小仿真分 析的计算量,但应将泡管包覆层考虑在内,以提高 仿真分析精度,更精确指导门框密封条的开发。

参考文献:

[1] 顾翔. 浅谈车门橡胶门框密封条设计[J]. 内燃机与配件,2018(17): 65-66.

GU X. Design of automobile door rubber sealing strip[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2018 (17) :65–66.

- [2] 包林康. 我国汽车橡胶密封条生产技术的现状及发展新趋势[J]. 中国橡胶,2005,21(5):20-24.
 BAOLK. Current status of Chinese auto rubber seals technology and new trends[J]. China Rubber, 2005,21(5):20-24.
- [3] 罗勇. 汽车密封胶条防水原理及控制要点[J]. 时代汽车,2016(6): 71-72.

LUO Y. Waterproof principle and control points of automobile sealing strip[J]. Auto Time, 2016(6):71–72.

- [4] 韦性林.汽车尾门密封条漏水分析[J]. 北京汽车,2020(6):35-38.
 WEI X L. Analysis on leakage of sealing strip of automobile tail door[J]. Beijing Automotive Engineering, 2020(6):35-38.
- [5] 王士英.浅析整车风噪控制因素[C].2020年海南科技学术论坛论文 集.海口:海南省机械工程学会,2020:123-128.

WANG S Y. Analysis of vehicle wind noise control factors[C]. Proceedings of Hainan science and technology academic forum in 2020.Haikou: Hainan Mechanical Engineering Society, 2020:123–128.

- [6] 张黎宏,董超,郭晓青. 基于门框密封条反力优化的车门静态关闭 力研究[J]. 汽车技术,2020(1):54-62.
 ZHANG L H, DONG C, GUO X Q. The research on door static closing force based on sealing strip counter force optimization[J]. Automobile Technology,2020(1):54-62.
- [7] DAVID A W, KENNETH N, MORMAN J, et al. Nonlinear analysis

of automotive door weatherstrip seals[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1997, 28(1): 33-50.

- [8] KENA M, NEWTON D. Study the effect of the weather strip on side door closing effort for passenger vehicle[C]. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. USA: IEOM Society International, 2018:142–155.
- [9] LI Q, ZHAO J C, LIU W B, et al. Analysis of the wrinkle of an automobile weather-strip seal in bending[J]. Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics, 2017, 56 (2): 124-133.
- [10] 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.
- [11] 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.

- [12] 冉英超,杨彦兵. 车门密封条污染钣金问题分析及对策[J]. 汽车 工艺与材料,2019(2):39-41.
 RAN Y C, YANG Y B. Analysis and countermeasures of sheet metal pollution caused by door sealing strip[J]. Automobile Technology & Material,2019(2):39-41.
- [13] OGDEN R W. Large deformation isotropic elasticity: on the correlation of theory and experiment for compressible rubberlike solids[J]. Proceedings of Royal Society, 1972 (328) :567–583.
- [14] OGDEN R W. Large deformation isotropic elasticity: on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids[J]. Proceedings of Royal Society, 1972 (326) :565–584.
- [15] 赵健. 汽车门框密封条结构的有限元分析研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.

ZHAO J. Finite element analysis of automobile sealing strip structure[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

收稿日期:2020-11-29

Simulation Analysis on Compression of Automobile Doorframe Sealing Strip

ZHENG Minggui, WANG Chunwei, CAO Qin, DONG Ying, JIANG Xianglian, YANG Piao, ZHANG Jinghuang (Dongfeng Motor Corporation, Wuhan 430058, China)

Abstract: The nonlinear finite element method was used to simulate the compression of the automobile doorframe sealing strip. The compression deformation and compression force of three simulation models and the test automobile doorframe sealing strips were compared. The results showed that, the compression force of the automobile doorframe sealing strip was mainly caused by the deformation of the bubble tube, and the deformation of the jaw had a certain influence on the compression force, but the influence was small. The difference between the performance of the inner and outer surface coating layer dense compound and the internal sponge compound of the bubble tube had a great influence on the compression force, which should be considered in the modeling to improve the simulation accuracy.

Key words: automobile doorframe sealing strip; compressing force; cross section deformation; finite element analysis