

# 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

王海军, 谷洲平

(山东水星博惠汽车部件股份有限公司, 山东 德州 253300)

**摘要:** 建立三元乙丙橡胶 (EPDM) 海绵本构模型, 采用Abaqus软件对其车门密封条压缩变形进行仿真分析与试验验证。结果表明, 采用材料力学性能试验数据拟合的EPDM海绵的Ogden模型材料参数有效, 密封条压缩力-变形的仿真分析结果与试验验证结果吻合。通过建立材料模型和对密封条结构进行仿真分析, 可有效缩短橡胶密封条开发周期, 提高开发效率。

**关键词:** 车门密封条; 海绵; 三元乙丙橡胶; 压缩变形; 仿真分析; 试验验证

**中图分类号:** TQ336.4<sup>+</sup>2; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X (2018) 00-0000-04

汽车车门关闭力直接影响车门关闭舒适性。车门关闭力与车门特性、铰链、门锁、限位器、气阻效应、橡胶密封条、使用环境等相关, 其中气阻效应和橡胶密封条的影响较大。根据美国福特汽车公司试验报告, 轿车车门橡胶密封条压缩力占车门关闭力的35%~50%, 而材料和断面结构决定橡胶密封条的压缩力<sup>[1]</sup>。

车门橡胶密封条的开发过程一般是: 对标→经验分析→试制→试验→评价→改进→验证, 该过程周期长及费用高。目前国内外运用有限元分析软件对车门橡胶密封条结构进行优化设计, 已经取得了一定成果, 采用的软件一般为Abaqus和Marc<sup>[2-3]</sup>。

本工作以三元乙丙橡胶 (EPDM) 海绵车门密封条的开发为例, 采用Abaqus软件, 先建立材料模型, 再对密封条压缩变形进行仿真分析, 并验证其分析的有效性。

## 1 材料模型建立

橡胶材料配方不同, 其适应的材料模型也不同。橡胶材料属于非线性超弹性材料, 其力学行为一般采用超弹性材料本构模型表征。R. W. Ogden<sup>[4]</sup>

**作者简介:** 王海军 (1980—), 男, 山东德州人, 山东水星博惠汽车部件股份有限公司工程师, 学士, 主要从事汽车橡胶制品的研制及项目管理工作。

**E-mail:** fervency@126.com

在1972年提出的超弹性橡胶材料本构模型称为Ogden模型:

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (1)$$

式中,  $W$  为应变能,  $\mu_i$  为模量,  $\alpha_i$  为指数,  $\lambda_j$  ( $j=1, 2, 3$ ) 为伸长率。

一般认为橡胶材料本身不可压缩或近似不可压缩, 而EPDM海绵为可压缩材料。在Ogden模型的基础上推导出可压缩海绵材料的本构模型<sup>[5]</sup>:

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\beta_i} (1 - J^{\beta_i}) \quad (2)$$

式中,  $\beta_i$  为常数,  $J$  为压缩体积变化率。

本工作采用Ogden模型对试验数据进行拟合, 其在Abaqus软件中表现形式如下<sup>[6]</sup>:

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i} \quad (3)$$

模型的材料参数可由材料力学性能试验数据拟合得到。

橡胶材料力学性能的基础试验有单轴和双轴、平面和体积、拉伸和压缩8种试验。而在长期的研究和试验中发现, 采用单轴拉伸、双轴拉伸、平面剪切和体积压缩试验可获得足够精确的试验数据。目前国际上将这4种材料试验定义为橡胶材料力学性能试验。

本研制EPDM海绵的视密度为 $0.65 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 对其进行单轴拉伸、双轴拉伸、平面剪切和体积压缩试验, 试验数据用式 (3) ( $n=3$ ) 进行拟合, 拟合的

材料参数如表1所示。

表1 EPDM海绵的Ogden模型材料参数

$i$	材料参数		
	$\mu_i$	$\alpha_i$	$D_i$
1	1.323 969 48	-3.945 967 62	0.140 000 00
2	-0.974 483 37	-4.456 160 73	0.900 000 00
3	0.690 006 13	-1.914 487 65	-1.020 000 00

## 2 密封条断面设计

EPDM海绵密封条设计使用自动计算机辅助设计(AutoCAD)软件完成,共设计5种断面密封条(1#—5#密封条),如图1—5所示。

## 3 密封条压缩变形的仿真分析与试验验证

### 3.1 仿真分析

EPDM海绵密封条断面压缩变形的仿真分析

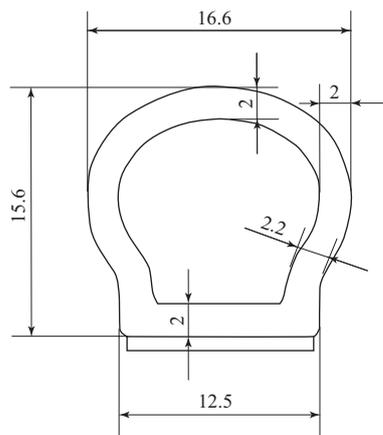


图1 1#密封条断面

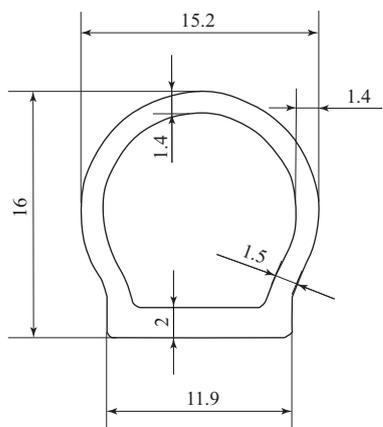


图2 2#密封条断面

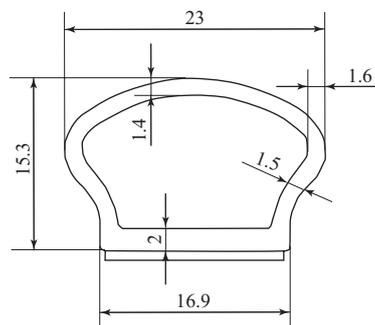


图3 3#密封条断面

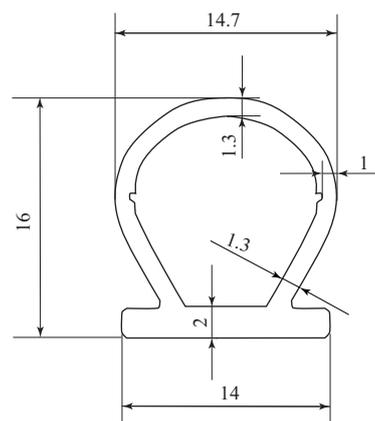


图4 4#密封条断面

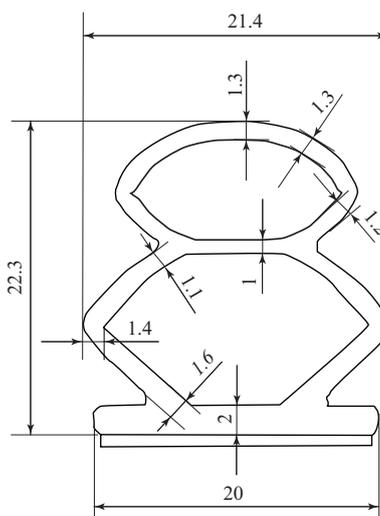


图5 5#密封条断面

采用Abaqus软件进行,并将其受力变形简化为二维平面应变进行分析。

1#—5#密封条的仿真压缩变形分别如图6—10所示,仿真压缩力-形变曲线如图11所示,仿真分析结果汇总如表2所示。

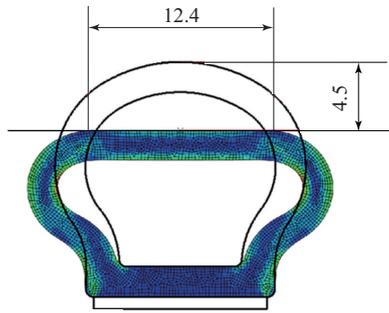


图6 1#密封条的仿真压缩变形

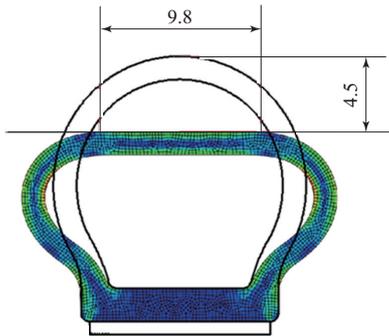


图7 2#密封条的仿真压缩变形

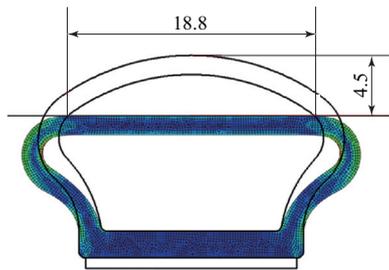


图8 3#密封条的仿真压缩变形

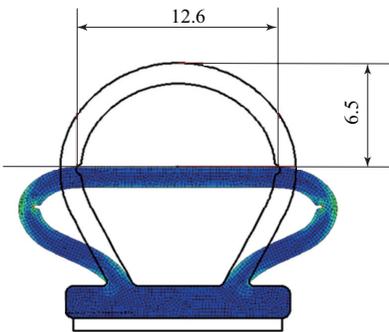


图9 4#密封条的仿真压缩变形

### 3.2 试验验证

通过挤出和硫化制备出1#—5#密封条成品,取投影(放大10倍)合格的密封条成品进行压缩

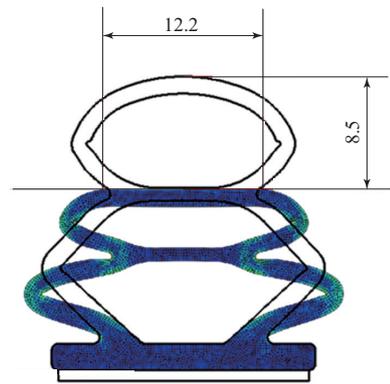
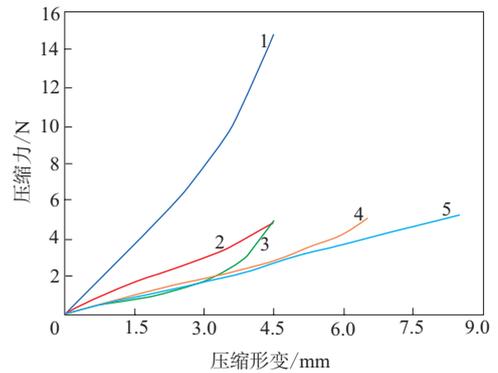


图10 5#密封条的仿真压缩变形



密封条编号:1—1#;2—2#;3—3#;4—4#;5—5#。

图11 1#—5#密封条的仿真压缩力-形变曲线

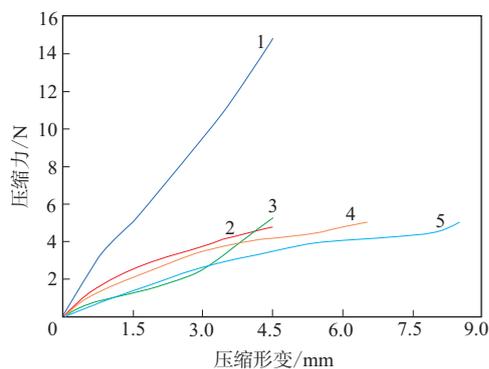
表2 EPDM海绵密封条压缩变形的仿真分析结果汇总

密封条编号	断面接触长度/mm	压缩力/N	压缩形变/mm
1#	12.4	14.8	4.5
2#	9.8	4.8	4.5
3#	18.8	4.9	4.5
4#	12.6	5.1	6.5
5#	12.2	5.2	8.5

变形试验<sup>[7-8]</sup>,即截取长度为100 mm的密封条试样进行压缩力-形变试验,试验设备为压缩负荷试验机。

1#—5#密封条的试验压缩力-形变曲线如图12所示,试验验证结果汇总如表3所示。

对比表2和3可以看出,密封条压缩变形的仿真分析结果与试验验证结果吻合。这证明了采用力学性能试验数据拟合的EPDM海绵的Ogden模型材料参数有效。



注同图11。

图12 1#—5#密封条的试验压缩力-形变曲线

表3 EPDM海绵密封条压缩变形的  
试验验证结果汇总

密封条 编号	断面接触长度/ mm	压缩力/ N	压缩形变/ mm
1#	12.0	14.8	4.5
2#	9.3	4.8	4.5
3#	18.2	5.3	4.5
4#	11.9	5.0	6.5
5#	12.3	5.0	8.7

#### 4 结语

EPDM海绵密封条压缩变形的仿真分析与试

验验证表明,在橡胶密封条开发时,通过建立材料模型和对密封条结构进行仿真分析,可有效缩短开发周期,避免传统橡胶密封条开发过程中反复试验、评价、改进的过程,从而提高开发效率。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李欢,李惠林,张斌,等.基于Msc. Marc的汽车车门密封条的起褶分析及优化[J]. 橡胶工业, 2015, 62(3): 169-171.
- [3] 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.
- [4] Ogden R W. Large Deformation Isotropic Elasticity: On the Correlation of Theory and Experiment for Compressible Rubberlike Solids[J]. Proceedings of Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Science, 1972, 326(1567): 565-584.
- [5] 赵建才. 轿车车门密封条结构的非线性有限元分析及优化设计研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2002.
- [6] 王永冠,李心,黄友剑. 橡胶计算中本构模型的选择[A]. 第4届全国橡胶制品技术研讨会论文集[C]. 北京: 中国化工学会橡胶专业委员会, 2007: 443-449.
- [7] 王海军,张勇护,张宝春. 密封条压缩力特性及耐重复性压缩的测试[J]. 汽车制造业, 2008(12): 86-87.
- [8] QC/T 710-2004, 汽车密封条压缩负荷试验方法[S].

收稿日期: 2017-08-19

## Simulation Analysis and Test Verification on Compression Deformation of EPDM Sponge Auto Weatherstrip

WANG Haijun, GU Zhouping

(Shandong Shuixing Bohui Auto Parts Co., Ltd., Dezhou 253300, China)

**Abstract:** The establishment of EPDM sponge material model was introduced, and the simulation analysis and test verification of compression deformation of EPDM sponge auto weatherstrip by Abaqus software. The results showed that, the material parameters of Ogden model for EPDM sponge were valid by fitting material mechanics performance test data. The result of the compression force-deformation simulation analysis on the weatherstrip was consistent with that of the test verification. Through the establishment of material model and simulation analysis on weatherstrip structure, the development cycle of weatherstrip could be shortened effectively, and the development efficiency could be enhanced.

**Key words:** weatherstrip; sponge; EPDM; compression deformation; simulation analysis; test verification