

测试·分析

# 轨道车辆空调送/回风口处橡胶密封条的 压缩性能分析

郭志伟, 张杰

(青岛明德慧创检测技术有限公司, 山东 青岛 266400)

**摘要:** 基于Mooney-Rivlin本构模型, 对轨道车辆空调送/回风口处橡胶密封条(简称橡胶密封条)的压缩性能进行分析, 并与橡胶密封条的单轴压缩试验(简称试验)测试的压缩性能进行对比。结果表明: 橡胶密封条试样的仿真分析与试验测试的压缩量误差在整个压缩区间内均小于10%, 采用Mooney-Rivlin本构模型分析橡胶密封条试样的压缩性能是可靠的; 橡胶密封条的仿真分析与试验测试的压缩量误差在整个压缩区间内均小于10%, 进一步验证了采用Mooney-Rivlin本构模型分析橡胶密封条的压缩性能的可靠性。本研究可为其他橡胶制品的非线性特性分析提供参考。

**关键词:** 轨道车辆空调; 橡胶密封条; 压缩性能; 仿真分析

**中图分类号:** TQ330.7<sup>+</sup>3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-890X(2023)08-0627-06

**DOI:** 10.12136/j.issn.1000-890X.2023.08.0627



OSID开放科学标识码  
(扫码与作者交流)

轨道车辆空调(简称空调)为城市交通中的重要设备, 对车辆内部空气的温度、湿度、流速、压力和品质起着控制作用<sup>[1-4]</sup>。为了给乘客提供舒适的环境, 需保证空调送/回风口与车辆主体(简称车体)风腔之间的密封性能, 空调送/回风口处橡胶密封条(简称橡胶密封条)的压缩量决定了其密封性能的好坏<sup>[5-6]</sup>。

本研究橡胶密封条为三元乙丙橡胶(EPDM)密封条, 其传统设计主要依靠试验数据和经验积累, 不仅提高了设计成本, 还提高了时间成本<sup>[7-8]</sup>。

随着计算机技术的发展, 采用仿真分析方法研究橡胶材料等非线性材料的力学性能成为一种趋势<sup>[9-16]</sup>。本工作基于Mooney-Rivlin本构模型对橡胶密封条的压缩性能进行了研究。

## 1 橡胶密封条及其设计参数

橡胶密封条的设计参数如表1所示。空调与

车体之间的橡胶密封条粘接在钣金上, 通过压接实现密封, 如图1所示。

表1 橡胶密封条的设计参数

Tab. 1 Design parameters of rubber sealing strips mm×mm

橡胶密封条	长度×宽度	
	外口	内口
空调送风口橡胶密封条	868×321	808×261
车体送风口橡胶密封条	903×355	843×295
空调回风口橡胶密封条	419×249	359×189
车体回风口橡胶密封条	454×284	394×224

注: 橡胶密封条厚度均为15 mm, 橡胶密封条的邵尔A型硬度均为(30±10)度。

## 2 橡胶材料的本构模型

橡胶材料的应变能密度函数( $W$ )为

$$W = f(I_1, I_2, I_3) \quad (1)$$

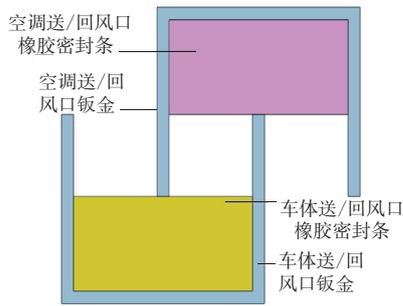
式中,  $I_1, I_2, I_3$ 为变形张量的3个不变量, 可用对应的3个伸长比(记为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ )表征。

**作者简介:** 郭志伟(1993—), 男, 山东青岛人, 青岛明德慧创检测技术有限公司助理工程师, 硕士, 主要从事环境可靠性检测工作。

**E-mail:** zhangsuli2010@163.com

**引用本文:** 郭志伟, 张杰. 轨道车辆空调送/回风口处橡胶密封条的压缩性能分析[J]. 橡胶工业, 2023, 70(8): 627-632.

**Citation:** GUO Zhiwei, ZHANG Jie. Analysis on compression performances of rubber sealing strips at air supply/return outlet of railway vehicle air-conditioner[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(8): 627-632.



(a) 三维模型



(b) 实际装配

图1 空调与车体间的橡胶密封条

Fig.1 Rubber sealing strips between air-conditioner and vehicle body

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (3)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \times \lambda_2^2 \times \lambda_3^2 \quad (4)$$

由橡胶材料的不可压缩特性可得:

$$I_3 = \lambda_1^2 \times \lambda_2^2 \times \lambda_3^2 = 1 \quad (5)$$

采用Rivlin推导的变形张量不变量级数形式, $W$ 可以表征为<sup>[8]</sup>:

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_i - 3)^i (I_j - 3)^j \quad (6)$$

式中, $N$ 为 $i+j$ 的上限值。

采用Mooney-Rivlin本构模型, $W$ 可以表征为:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (7)$$

式中, $C_{10}$ 和 $C_{01}$ 为材料常数。

根据Kirchoff应力张量和Green应变张量的关系,橡胶材料的主应力( $\sigma_i$ )和主伸长比( $\lambda_i$ )的关系如下:

$$\sigma_i = 2 \left( \lambda_i^2 \frac{\partial W}{\partial I_1} - \frac{1}{\lambda_i^2} \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (8)$$

式中, $\lambda_i = 1 + \varepsilon_i$ , $\varepsilon_i$ 为主应变。

3个方向的 $\sigma_i$ 差值为:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2) \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_3^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (9)$$

$$\sigma_2 - \sigma_3 = 2(\lambda_2^2 - \lambda_3^2) \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_1^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (10)$$

$$\sigma_3 - \sigma_1 = 2(\lambda_3^2 - \lambda_1^2) \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_2^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (11)$$

对于单轴拉伸或压缩试验, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ,结合式(4)可得:

$$\sigma_1 = 2 \left( \lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1} \right) \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (12)$$

令

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial I_1} = C_{10} \\ \frac{\partial W}{\partial I_2} = C_{01} \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)可得:

$$Y = \frac{\sigma_1}{2(\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1})} = C_{10} + \frac{1}{\lambda_1} C_{01} = C_{10} + C_{01} X \quad (14)$$

$$X = \frac{1}{\lambda_1} \quad (15)$$

根据压缩试验得到橡胶材料的压缩量-压力曲线,用压力除以橡胶材料的压缩面积得到 $\sigma_1$ ,用压缩量除以橡胶材料的原始高度得到 $\varepsilon_1$ ,将 $\sigma_1$ 和 $\varepsilon_1$ 代入式(14),以 $Y$ 为纵坐标、 $X$ 为横坐标绘制 $Y-X$ 曲线,并采用最小二乘法进行线性拟合,可得橡胶材料Mooney-Rivlin本构模型的 $C_{10}$ 和 $C_{01}$ (分别为拟合线的截距和斜率)。

### 3 橡胶密封条试样的材料常数确定及其仿真分析验证

按照GB/T 7757—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶压缩应力应变性能的测定》中的方法C<sup>[16]</sup>,从橡胶密封条(以车体送风口处橡胶密封条为例)中截取100 mm作为试样进行单轴压缩试验(简称试验)。

将试验结果转化为式(14)中的 $X$ 和 $Y$ ,绘制橡胶密封条试样的Mooney-Rivlin本构模型曲线,如图2所示。

将橡胶密封条试样的Mooney-Rivlin本构模型曲线数据导入Origin软件并进行线性拟合,得到 $C_{10}$ 和 $C_{01}$ 分别为0.101 35和-0.034 81。

橡胶密封条试样的有限元模型如图3所示。

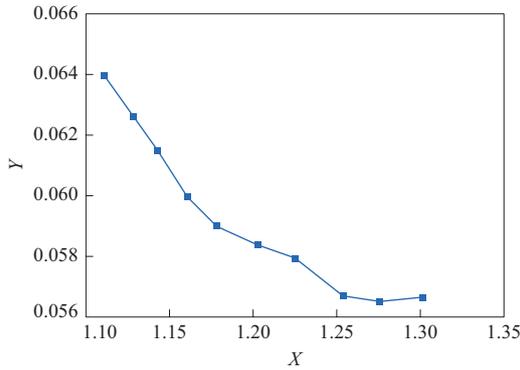


图2 橡胶密封条试样的Mooney-Rivlin本构模型曲线  
Fig. 2 Mooney-Rivlin constitutive model curve of rubber sealing strip sample

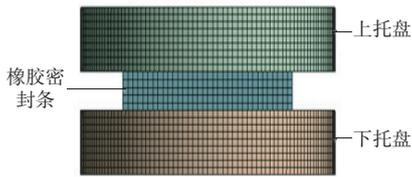


图3 橡胶密封条试样的有限元模型  
Fig. 3 Finite element model of rubber sealing strip sample

其中,将拉伸试验机上/下托盘材料设置为06Cr19Ni10不锈钢,橡胶密封条试样材料设置为EPDM胶料,具体材料参数如表2所示。橡胶密封条与托盘之间设置为绑定接触,下托盘底部采用固定约束,上托盘顶部承受压力。

表2 橡胶密封条试样的材料参数  
Tab. 2 Material parameters of rubber sealing strip samples

项 目	橡胶密封条标准试样材料	
	06Cr19Ni10不锈钢	EPDM胶料
弹性模量/MPa	200 000	
泊松比	0.30	0.50
密度/(Mg · m <sup>-3</sup> )	7.850	1.150
C <sub>10</sub> /MPa		0.101 35
C <sub>01</sub> /MPa		-0.034 81

在不同压力(以30 N的量级逐步加载)下橡胶密封条试样压缩的有限元分析结果如图4所示。以橡胶密封条试样的压缩量为纵坐标、压力为横坐标绘制曲线,如图5所示。

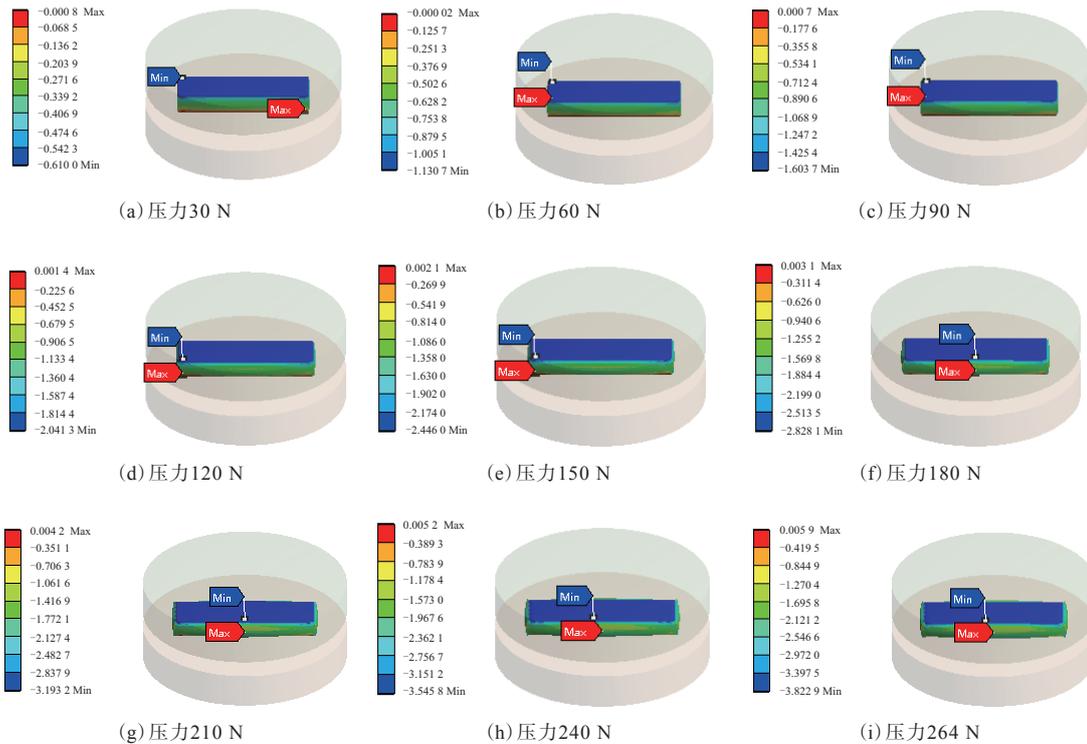
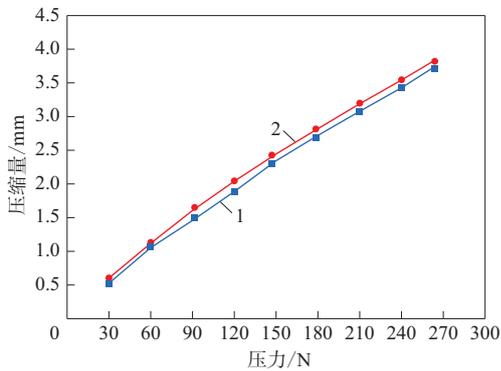


图4 橡胶密封条试样压缩的有限元分析结果(位移云图)  
Fig. 4 Finite element analysis results (displacement nephograms) of compression of rubber sealing strip sample



1—试验;2—仿真分析(最大压缩量)。

图5 橡胶密封条试样的压缩量-压力曲线

Fig. 5 Compression values-pressure curves of rubber sealing strip sample

在压力为264 N时,橡胶密封条试样的试验测试的压缩量为3.75 mm,达到设计值的25%。从图4和5可以看出:与试验测试的压缩量相比,在压力为264 N时,橡胶密封条试样的仿真分析的压缩量为3.822 9 mm,与试验测试的压缩量误差仅为1.94%;在其他压力下,橡胶密封条试样的仿真分析与试验测试的压缩量误差也均未超过10%,这表明本工作橡胶密封条试样采用Mooney-Rivlin本构模型材料常数的设定可靠。

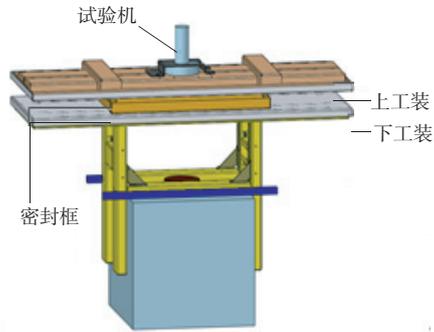
#### 4 橡胶密封条的仿真分析与试验测试

在橡胶密封条试样仿真分析与试验测试的基础上,对橡胶密封条(以车体送风口/回风口处橡胶密封条为例)的压缩特性进行进一步研究。

橡胶密封条的压缩试验设备如图6所示。其中,上工装代表空调室内腔底板钣金,下工装代表车顶钣金,上、下工装材质均为06Cr19Ni10不锈钢。有限元分析中橡胶密封条的压力分别以100和50 N的量级逐步增大,最大载荷设置为试验中压缩量达到设计值时所对应的数值。

橡胶密封条压缩的有限元分析结果如图7所示,车体送风口和回风口橡胶密封条的压缩量-压力曲线分别如图8和9所示。

当压力分别达到1 150和650 N时,车体送风口和回风口橡胶密封条的试验测试的压缩量均为3.75 mm,达到设计值的25%。从图7—9可以看出,在压力分别为1 150和650 N时,车体送风口和回风口橡胶密封条的仿真分析的压缩量分别为



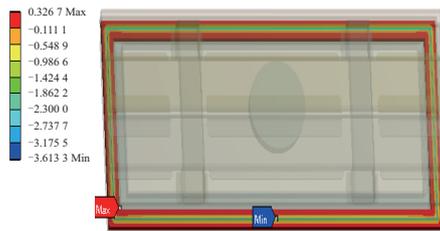
(a) 三维模型



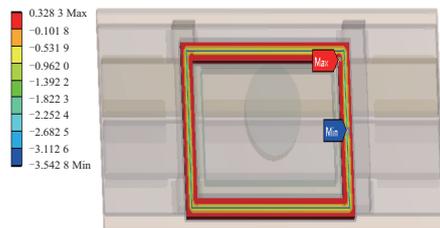
(b) 压缩试验

图6 橡胶密封条的压缩试验设备

Fig. 6 Compression test equipment of rubber sealing strip



(a) 车体送风口橡胶密封条(压力1 150 N)

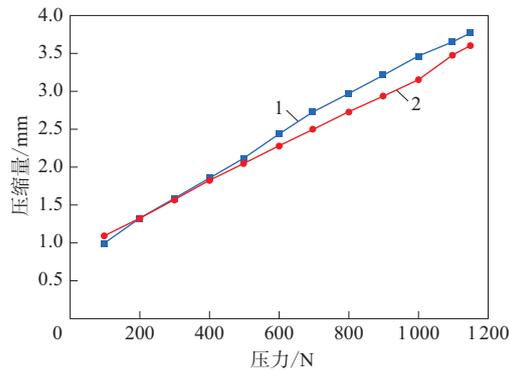


(b) 车体回风口橡胶密封条(压力650 N)

图7 橡胶密封条压缩的有限元分析结果(位移云图)

Fig. 7 Finite element analysis results ( displacement nephograms) of compression of rubber sealing strips

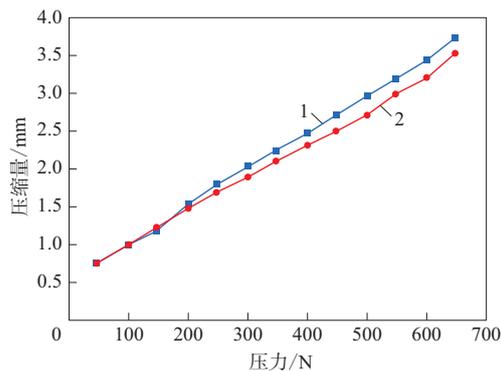
3.613 3和3.542 8 mm,与试验测试的压缩量误差分别为3.65%和5.52%,橡胶密封条的仿真分析与试验测试的压缩量-压力曲线高度一致,进一步



注同图5。

图8 车体送风口橡胶密封条的压缩量-压力曲线

Fig. 8 Compression values-pressure curves of rubber sealing strip at air supply outlet of vehicle body



注同图5。

图9 车体回风口橡胶密封条的压缩量-压力曲线

Fig. 9 Compression values-pressure curves of rubber sealing strip at air return outlet of vehicle body

验证了采用Mooney-Rivlin本构模型研究橡胶密封条的压缩性能是可行的。

## 5 结论

基于Mooney-Rivlin本构模型,对橡胶密封条的压缩性能进行了研究,得出如下结论。

(1) 橡胶密封条试样的仿真分析与试验测试的压缩量误差在整个压缩区间内均小于10%,采用Mooney-Rivlin本构模型分析橡胶密封条试样的压缩性能是可靠的。

(2) 橡胶密封条的仿真分析与试验测试的压缩量误差在整个压缩区间内均小于10%,进一步验证了采用Mooney-Rivlin本构模型分析橡胶密封条的压缩性能的可靠性。

(3) 对于其他橡胶制品的非线性特性的研究

也可采用本工作的方法。

## 参考文献:

- [1] 李国庆. 城市轨道交通通风空调系统技术发展新趋势[J]. 都市轨道交通, 2004, 17(6): 5-7.  
LI G Q. Technological trends of ventilation and air-conditioning system in urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2004, 17(6): 5-7.
- [2] 王永鏢, 王彦鲁, 刘忠庆, 等. 国外轨道车辆空调系统能耗研究概述[J]. 智慧轨道交通, 2022, 59(4): 88-90.  
WANG Y B, WANG Y L, LIU Z Q, et al. Overview of energy consumption research in air conditioning system of railway vehicles abroad[J]. Smart Rail Transit, 2022, 59(4): 88-90.
- [3] 吴永深, 李玉奎, 马英华. PHM技术在轨道车辆空调中的应用研究[J]. 技术与市场, 2020, 27(10): 30-32.  
WU Y S, LI Y K, MA Y H. Application of PHM technology in air conditioning of rail vehicles[J]. Technology and Market, 2020, 27(10): 30-32.
- [4] 周波, 高博, 李进. 轨道车辆空调系统维修模式应用与探讨[J]. 电子质量, 2021(9): 56-58, 64.  
ZHOU B, GAO B, LI J. Application and discussion on maintenance mode of air conditioning system for rail vehicles[J]. Electronics Quality, 2021(9): 56-58, 64.
- [5] 韦玉明. 汽车密封性能改进及设计优化研究[J]. 企业科技与发展. 2020(9): 32-36.  
WEI Y M. Research on improvement and design optimization of automotive sealing performance[J]. Enterprise Science and Technology & Development, 2020(9): 32-36.
- [6] 邓长海. 市域快轨车辆主要部件密封性措施的研究[J]. 铁道车辆, 2021, 59(1): 47-48, 96.  
DENG C H. Research on sealing measures for main parts on inner-city rapid rail transit vehicle[J]. Rolling Stock, 2021, 59(1): 47-48, 96.
- [7] 曾鹏, 王坚, 张旭辉, 等. 不同截面EPDM密封圈密封性能仿真分析[J]. 客车技术与研究, 2022, 44(3): 30-33, 36.  
ZENG P, WANG J, ZHANG X H, et al. Simulation and analysis of sealing performance of EPDM seal ring with different cross section[J]. Bus & Coach Technology and Research, 2022, 44(3): 30-33, 36.
- [8] 廖丽娜. 浅析汽车用EPDM橡胶密封条生产工艺控制[J]. 时代汽车, 2022(11): 131-133.  
LIAO L N. The production process control of EPDM rubber sealing strip on vehicle analysis[J]. Auto Time, 2022(11): 131-133.
- [9] 张良, 李忠华, 马新强. 橡胶Mooney-Rivlin超弹性本构模型的参数特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(z1): 427-430.

- ZHANG L, LI Z H, MA X Q. Study on parameter characteristics of rubber Mooney-Rivlin model[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(z1):427-430.
- [10] 屠璐琼, 吴佳钉, 胡清波. 橡胶压缩Mooney-Rivlin本构模型参数拟合分析[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(z1):42-45.
- TU L Q, WU J D, HU Q B. Parameters fitting analysis of compressive Mooney-Rivlin constitutive model of rubbers[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(z1):42-45.
- [11] 姚艳春, 王国权, 赵诚, 等. 基于Mooney-Rivlin本构模型橡胶防尘罩的非线性有限元分析[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2013, 28(4):52-56.
- YAO Y C, WANG G Q, ZHAO C, et al. Nonlinear finite element analysis of rubber dust cover based on Mooney-Rivlin constitutive model[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University (Natural Science Edition), 2013, 28(4):52-56.
- [12] 邵晓宙. 金属橡胶超弹性本构模型研究及其有限元二次开发[D]. 太原: 中北大学, 2021.
- SHAO X Z. Research on the superelastic constitutive model of metal rubber and its finite element secondary development[D]. Taiyuan: North University of China, 2021.
- [13] 高飞. 新能源汽车电池包的三元乙丙橡胶密封圈研究[J]. 橡胶工业, 2022, 69(5):364-368.
- GAO F. Study on EPDM sealing ring for battery pack of new energy vehicle[J]. China Rubber Industry, 2022, 69(5):364-368.
- [14] 黄敏, 黄舟, 贾东, 等. 基于压缩试验的两种橡胶材料本构模型分析[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(z1):483-486.
- HUANG M, HUANG Z, JIA D, et al. Constitutive models of two kinds of rubber material based on compression tests[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(z1):483-486.
- [15] 谢贵山, 韩启明. 基于Marc的车门橡胶密封条优化设计[J]. 企业科技与发展, 2017(7):22-25, 28.
- XIE G S, HAN Q M. Optimization design of door sealing strip based on Marc[J]. Enterprise Science and Technology & Development, 2017(7):22-25, 28.
- [16] 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.
- WANG C W, ZHENG M G, CAO Q, et al. Compression simulation analysis of tailgate sealing strip for passenger cars[J]. China Rubber Industry, 2022, 69(1):23-27.
- [17] 全国橡胶与橡胶制品标准化技术委员会橡胶物理和化学分技术委员会. 硫化橡胶或热塑性橡胶压缩应力应变性能的测定: GB/T 7757—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

收稿日期: 2023-03-21

## Analysis on Compression Performances of Rubber Sealing Strips at Air Supply/Return Outlet of Railway Vehicle Air-conditioner

GUO Zhiwei, ZHANG Jie

(Qingdao Mingde Huichuang Testing Technology Co., Ltd., Qingdao 266400, China)

**Abstract:** Based on the Mooney-Rivlin constitutive model, the compression performances of the rubber sealing strips at the air supply/return outlet of railway vehicle air-conditioner (referred to as rubber sealing strip) was analyzed, and compared with the experimental results by uniaxial compression test (referred to as the test). The results showed that, for both the rubber sealing strip sample and the rubber sealing strip, the errors between the compression values obtained from the simulation analysis and the test were less than 10% in the whole compression range, which indicated that it was reliable to use Mooney-Rivlin constitutive model to analyze the compression performance of the rubber sealing strip sample and the rubber sealing strip. The research outcome could also provide references for the analysis of nonlinear characteristics of other related rubber products.

**Key words:** railway vehicle air-conditioner; rubber sealing strip; compression performance; simulation analysis