

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.06.007

# 微孔聚氨酯弹性材料的力学性能研究

白晓鹏<sup>1,2</sup>, 丁智平<sup>1</sup>, 唐先贺<sup>2</sup>, 黄友剑<sup>2</sup>, 穆龙海<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学机械工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 为了分析微孔聚氨酯弹性材料的力学性能, 分别对微孔聚氨酯弹性材料试样进行了拉伸和压缩试验; 再利用拉伸与压缩试验数据对常见的经典超弹本构模型进行拟合, 得出了相应的本构模型参数; 通过误差分析对各种本构模型在不同应变条件下的适用性进行了分析探讨; 最后, 用拟合出的本构参数对高铁轨道用 WJ-8 扣件的微孔聚氨酯弹性垫板的静刚度进行数值模拟, 有限元仿真结果与产品试验结果进行对比, 说明了 Yeoh 模型、Van der Waals 模型和 Ogden  $N=3$  模型的预测值与试验值的相对误差分别为 8.44%, 7.83% 和 5.93%, Ogden  $N=3$  模型相对于其他模型具有更高的预测精度。

**关键词:** 微孔聚氨酯; 本构模型; 力学性能; 误差

**中图分类号:** TQ328.3; TH140.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2014)06-0032-06

## Research of Mechanical Properties of Microcellular Polyurethane Elastic Material

Bai Xiaopeng<sup>1,2</sup>, Ding Zhiping<sup>1</sup>, Tang Xianhe<sup>2</sup>, Huang Youjian<sup>2</sup>, Mu Longhai<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;  
2. Zhuzhou Time New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In order to analyze the mechanical properties of microcellular polyurethane elastic materials, the tensile and compression experiments were carried out. The experimental data was used to fit the classic hyperelastic constitutive models, and the parameters of the constitutive models were obtained. Through the error analysis, the applicability of constitutive models was discussed under different strain conditions. The fitted constitutive parameters were applied to simulate the static stiffness of WJ-8 fastener polyurethane elastic pad used for high speed railway, and the finite elemental simulation results were compared with the product test results, it showed that the relative errors between the tested values and the predicted values of Yeoh model, Van der Waals model and Ogden  $N=3$  model were 8.44%, 7.83% and 5.93% respectively, and the Ogden  $N=3$  model had higher prediction accuracy than other models.

**Keywords:** microcellular polyurethane; constitutive model; mechanical property; error

## 0 引言

随着我国高速列车的迅速发展, 铁路营运时速不断提升, 传统有渣轨道面临的临界速度、桥上稳

定性、道砟飞溅等问题难以解决。无渣轨道因其优良的综合性能在高速铁路建设中被大量使用。无渣轨道中的关键减振部件是 WJ-8 扣件系统, 其中作为弹性元件的弹性垫板起主要的减振作用<sup>[1-3]</sup>。相对于

收稿日期: 2014-09-24

基金项目: 中央财政创新团队专项基金资助项目(0420036017), 湖南省十二五机械工程重点学科基金资助项目(湘教发[2011]76号)

作者简介: 白晓鹏(1989-), 男, 河北赵县人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为机械结构强度, E-mail: chenyzjin@163.com

通信作者: 丁智平(1956-)男, 湖南桃江人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事机械结构强度方面的教学与研究,

E-mail: dzp0733@sohu.com.cn

橡胶垫板,微孔聚氨酯弹性垫板具有更好的机械性能和加工性能,在高速铁路无渣轨道的建设中逐渐得到应用。

国内对于微孔聚氨酯弹性材料力学性能的研究成果还不多。罗玉媛等<sup>[4]</sup>对WJ-8扣件中的聚氨酯弹性垫板分别进行长时限压缩15%、20%、25%试验,并测定应力松弛过程,应用五元件广义Maxwell模型对应力松弛过程进行数学模拟,试验结果表明五元件广义Maxwell模拟能很好地拟合弹性垫板的应力松弛过程。周志强<sup>[5]</sup>对微孔聚氨酯轨下垫板进行了动、静刚度和疲劳试验,试验结果表明该弹性垫板的综合性能完全满足铁路建设的相关要求。秦培成等<sup>[6]</sup>对聚氨酯硬质泡沫材料在室温下进行加载速度为 $2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 准静态拉伸、压缩、剪切试验,并基于其应力应变试验曲线来拟和回归本构模型,将其应用到金属夹芯板中,并进行有限元分析,其结果与试验结果吻合较好。王亚萌<sup>[7]</sup>通过对比微孔聚氨酯减振材料和橡胶减振材料在汽车减振系统上的应用,说明了微孔聚氨酯材料在汽车减振领域应用的优越性。

对于轨道轨下弹性垫板,静刚度是衡量其减振性能的一个重要技术参数。通过材料力学性能试验,利用有限元仿真技术对产品刚度进行预测,可以有效地节省物力人力,缩短产品研发周期,这具有重要的工程意义。因此,本文对轨道交通用微孔聚氨酯弹性材料进行力学性能试验,探讨材料适用的本构模型,并对WJ-8扣件的微孔聚氨酯弹性垫板进行有限元仿真分析,验证了微孔聚氨酯弹性垫板的本构模型仿真值和试验值相吻合。为微孔聚氨酯弹性元件的静刚度预测提供理论依据和技术支持。

## 1 微孔聚氨酯弹性体的试验

为了深入了解WJ-8扣件用的微孔聚氨酯弹性体材料的力学特性,结合其实际应用工况,本文进行了微孔聚氨酯弹性体材料的单轴拉伸(加载和卸载循环)和压缩(加载和卸载循环)试验。

### 1.1 试验设备及方案

试验在株洲时代新材科技股份有限公司技术中心强度硬度实验室完成。试验设备为Zwick/Roell公司生产的Z010型电子万能试验机。材料试样均是从同一批次WJ-8微孔聚氨酯弹性垫板上裁取。

#### 1.1.1 单轴拉伸试验

单轴拉伸试样参考GB/T 528—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》标准。本文采用I型哑铃状试样,如图1所示。在图中,试样标距:宽度 $D=12.0\pm 0.5\text{ mm}$ ,长度 $C=25.0\pm 0.5\text{ mm}$ 。试

验时,室温为 $23\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,加载速率为 $0.2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,试验采用位移控制。

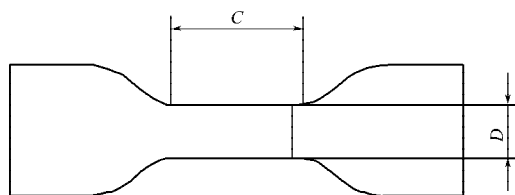


图1 拉伸试样形状示意图

Fig. 1 Tensile specimen shape sketch

本文进行了4次拉伸和卸载试验。具体操作步骤如下:以 $0.2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 加载速率进行拉伸和卸载试验。第1次拉伸长度为标距长度的25%时,停止1s后,以相同速率卸载至应变为0;以同样的方式进行第2次、第3次和第4次拉伸,拉伸长度分别为标距长度的50%、75%和100%,并记录整个过程的应力应变数据。

#### 1.1.2 压缩试验

压缩试样参考GB/T 7757—1993《硫化橡胶或热塑性橡胶压缩应力应变性能的测定》标准,试样如图2所示。在图中,试样尺寸:直径为 $29.0\pm 0.5\text{ mm}$ ,高为 $12.0\pm 0.5\text{ mm}$ 。试验时,室温为 $23\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,压缩速率为 $0.2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,系统采用位移控制。为了尽量减小试验误差,创造无摩擦的压缩条件,在试样的最上端和最下端分别放置光滑的硬塑料薄膜,使薄膜和试样之间的摩擦系数非常低,便于试样在压缩时自由变形。

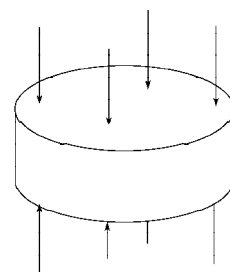


图2 压缩试样示意图

Fig. 2 Compressed specimen shape sketch

本文进行了3次压缩和卸载试验。具体操作步骤如下:当夹头下压至试样有数字显示后,将应变值清零,开始记录应力应变数据,压缩至试样高度的20%时,停止1s后,以同样速率卸载至应变为0;以同样的方式分别压缩至试样高度的40%和60%,并记录整个过程的应力应变数据。

### 1.2 试验结果与分析

材料的拉伸和压缩试验结果如图3和图4所示。由图3和图4可以看出:

1) 微孔聚氨酯弹性体的压缩和拉伸应力应变曲线均呈现出高度的弹性和非线性,且其拉伸与压缩应力应变曲线明显不同;

2) 微孔聚氨酯弹性体在循环加载第1次呈现较强的Mullins软化效应,尤其是应变较大时此种现象更为明显,另外其压缩和拉伸永久变形均小于0.5%。

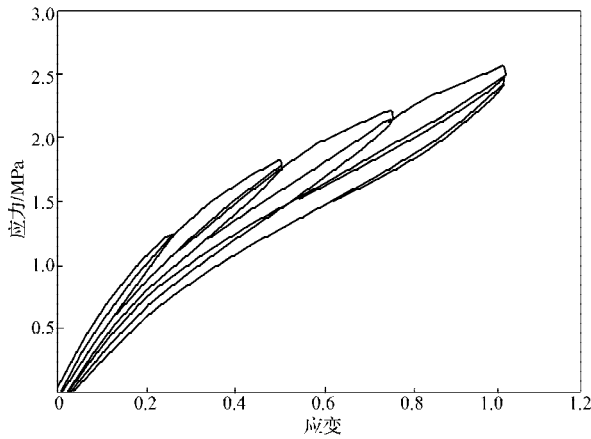


图3 拉伸应力应变曲线

Fig. 3 Tensile stress strain curve

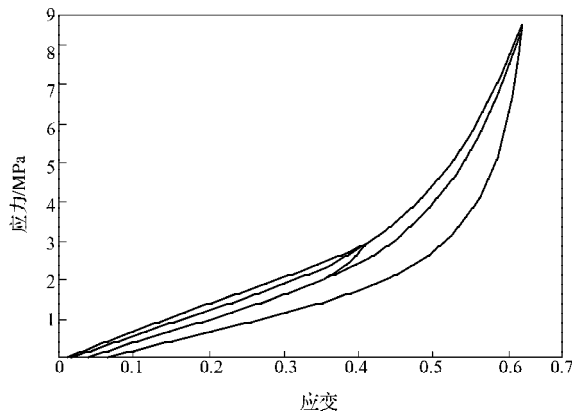


图4 压缩应力应变曲线

Fig. 4 Compression stress strain curve

典型低密度泡沫压缩应力应变曲线如图5所示。对比图4和图5可知,微孔聚氨酯材料的性能与超弹性材料类似,但其压缩应力应变曲线没有出现像图5中那样明显的平台区域。显然,不适合用低密度泡沫的本构模型<sup>[5]</sup>对微孔聚氨酯材料进行模拟。对于微孔聚氨酯材料,可忽略其可压缩性,采用经典超弹性材料本构模型进行拟合。

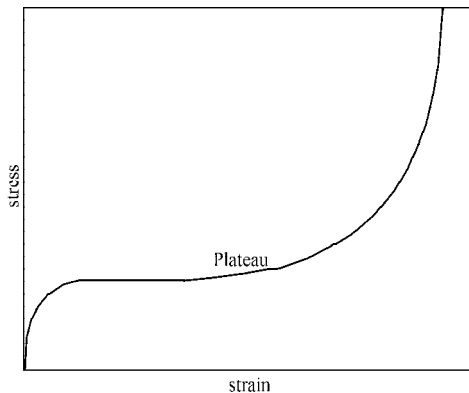


图5 典型低密度泡沫压缩应力应变曲线

Fig. 5 Compression stress strain curve for typical low density foam

## 2 经典超弹材料本构模型介绍

经典超弹性材料本构模型主要分为两大类:一是热力统计学模型;二是基于唯像理论的连续介质力学模型。

### 2.1 热力统计学模型

常用的经典热力统计学模型有 Arruda-Boyce(A-B)模型<sup>[8-9]</sup>和 Van der Waals(VDW)模型。

Arruda-Boyce模型定义的应变能表达式为

$$U = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (\bar{I}_1^i - 3^i) + \frac{1}{D} \left( \frac{J^2 - 1}{2} - \ln J \right), \quad (1)$$

式中:  $\mu$  为初始切变模量;  $\lambda_m$  为自锁应变;  $\bar{I}_1$  为应变不变量;  $J$  为体积比;  $C_i, D$  为材料参数。

Van der Waals模型定义的应变能表达式为

$$U = \mu \left\{ -(\lambda_m^2 - 3) [\ln(1 - \eta) + \eta] - \frac{2}{3} \alpha \left( \frac{\tilde{I} - 3}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} + \frac{1}{D} \left( \frac{J^2 - 1}{2} - \ln J \right), \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  为系数;  $\eta = \sqrt{\frac{\tilde{I} - 3}{\lambda_m^2 - 3}}$ ;  $\tilde{I} = (1 - \beta)\bar{I}_1 + \beta\bar{I}_2$  其中, 参数  $\beta$  是将应变不变量  $\bar{I}_1$  和  $\bar{I}_2$  混合成  $\tilde{I}$  的线性参数。

### 2.2 唯象学理论模型

基于连续介质力学理论,唯象学模型认为超弹性材料在未发生形变时是各向同性的。用单位体积的应变能函数  $U$  来描述橡胶的基本特性。应变能函数可以表示成变形张量  $I_i$  或主伸长比  $\lambda_i$  的 3 个应变不变量的函数,即

$$U = f(I_1, I_2, I_3), \quad (3)$$

$$U = f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3). \quad (4)$$

常用的唯象学模型主要有  $N$  次多项式形式模型和 Ogden 形式模型。

#### 1) 多项式模型

Mooney-Rivlin<sup>[10]</sup>(M-R)模型是完全多项式模型中最简单的一个模型。当阶数  $N=1$  时,有

$$U = C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + C_{01} (\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1} (J - 1)^2, \quad (5)$$

式中,  $C_{10}, C_{01}, D_1$  均为材料参数。

Neo-Hookean(N-H)模型是减缩多项式中的一个最简单形式。当阶数  $N=1$  时,有

$$U = C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1} (J - 1)^2. \quad (6)$$

Yeoh 模型<sup>[11]</sup>是减缩多项式阶数  $N=3$  时的特殊形式,即

$$U = \sum_{i=1}^3 C_{i0} (\bar{I}_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i} \quad (7)$$

式中  $C_{i0}$ ,  $D_i$  为材料参数。

2) Ogden<sup>[12]</sup>模型的应变能表达式以  $\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2, \bar{\lambda}_3$  为变量。其应变能表达式为

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3)^i + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i} \quad (8)$$

式中  $\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2, \bar{\lambda}_3$  为主伸长比。

### 3 本构模型参数拟合与误差分析

在 Abaqus 有限元软件中, 利用试验数据拟合本构模型参数, 只能使用材料的等双轴拉伸数据。因此, 需要将本文的压缩试验数据转换为等双轴拉伸数据。假设材料为不可压缩, 对于不可压缩的超弹性材料<sup>[13]</sup>的单轴压缩等效于等双轴拉伸, 如图6所示。

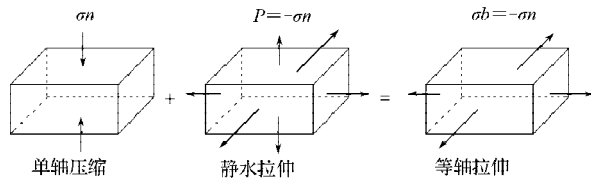


图6 单轴压缩与等双轴拉伸等效示意图

Fig. 6 The equivalent diagram of uniaxial compression and biaxial tensile

图6表示等轴拉伸试验与单向受压试验是等价的。它们之间的关系可表示为:

$$\begin{cases} \sigma_c = \sigma_b (1 + \varepsilon_b)^3, \\ \varepsilon_c = \frac{1}{(\varepsilon_b + 1)^2} - 1. \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\sigma_b, \varepsilon_b$  为等轴拉伸时的名义应力和应变;  $\sigma_c, \varepsilon_c$  为单向压缩时的名义应力和应变。

可以导出:

$$\begin{cases} \sigma_b = \sigma_c (\varepsilon_c + 1)^{\frac{3}{2}}, \\ \varepsilon_b = (\varepsilon_c + 1)^{\frac{1}{2}} - 1. \end{cases} \quad (10)$$

通过式(10)将压缩试验数据转换为等双轴拉伸数据。在 Abaqus 软件中, 应用最小二乘法将材料的单轴拉伸和转换等双轴拉伸试验数据, 拟合得到材料本构模型参数。最小二乘法拟合的相对误差为  $E$ , 其公式为

$$E = \sum_{i=1}^n (1 - T_i^{\text{model}} / T_i^{\text{test}}), \quad (11)$$

式中:  $T_i^{\text{test}}$  为试验应力值;  $T_i^{\text{model}}$  为模型预测应力值。

本文分别选用3种不同的拉/压载荷水平(①拉

伸0%~25%和压缩0%~20%; ②拉伸0%~50%和压缩0%~40%; ③拉伸0%~75%和压缩0%~60%)下的应力应变数据, 拟合得出本构参数如表1~3所示。

表1 在拉伸0%~25%和压缩0%~20%载荷水平下的拟合本构参数

Table 1 The fitting constitutive parameters under loading levels of 0%~25% tensile and 0%~20% compression

模型	参数	取值	模型	参数	取值
M-R 模型	$C_{10}$	2.345	Ogden $N=3$ 模型	$\mu_1$	9.390
	$C_{01}$	-1.265		$\mu_2$	-4.003
N-H 模型	$C_{01}$	0.95		$\mu_3$	-7.190
	$C_{10}$	1.032		$\alpha_1$	14.190
Yeoh 模型	$C_{20}$	-9.906		$\alpha_2$	15.709
	$C_{30}$	-4.359		$\alpha_3$	-17.570
Ogden $N=1$ 模型	$\mu$	1.957	A-B 模型	$\mu$	1.919
	$\alpha$	6.065		$\mu_0$	1.919
VDW 模型	$\mu$	2.149		$\lambda$	526.55
	$\lambda$	10.06			
	$\alpha$	0.903 8			

表2 在拉伸0%~50%和压缩0%~40%载荷水平下的拟合本构参数

Table 2 The fitting constitutive parameters under loading levels of 0%~50% tensile and 0%~40% compression

模型	参数	取值	模型	参数	取值
M-R 模型	$C_{10}$	1.081	Ogden $N=3$ 模型	$\mu_1$	112.6
	$C_{01}$	0.213		$\mu_2$	-52.95
N-H 模型	$C_{01}$	0.861		$\mu_3$	-57.62
	$C_{10}$	1.049		$\alpha_1$	1.259
Yeoh 模型	$C_{20}$	-0.545		$\alpha_2$	1.754
	$C_{30}$	0.290 3		$\alpha_3$	0.768
Ogden $N=1$ 模型	$\mu$	1.721	A-B 模型	$\mu$	1.722
	$\alpha$	2.355		$\mu_0$	1.722
VDW 模型	$\mu$	2.192		$\lambda$	1 860.20
	$\lambda$	10.004			
	$\alpha$	0.819			

表3 在拉伸0%~75%和压缩0%~60%载荷水平下的拟合本构参数

Table 3 The fitting constitutive parameters under loading levels of 0%~75% tensile and 0%~60% compression

模型	参数	取值	模型	参数	取值
M-R 模型	$C_{10}$	0.876	Ogden $N=3$ 模型	$\mu_1$	192.05
	$C_{01}$	-0.142		$\mu_2$	-91.327
N-H 模型	$C_{01}$	0.696		$\mu_3$	-99.114
	$C_{10}$	0.837		$\alpha_1$	2.432
Yeoh 模型	$C_{20}$	-0.206		$\alpha_2$	2.716
	$C_{30}$	0.056 5		$\alpha_3$	2.150
Ogden $N=1$ 模型	$\mu$	1.372	A-B 模型	$\mu$	1.393 4
	$\alpha$	2.551		$\mu_0$	1.393 4
VDW 模型	$\mu$	1.816		$\lambda$	2 360.68
	$\lambda$	3.574 3			
	$\alpha$	1.124			

为了确定本构模型对试验数据的整体拟合效果,

通过试验值与模型预测值的平均相对误差  $e$  的大小进行检验。平均相对误差  $e$  为

$$e = \frac{\sum_{i=1}^m \left| \frac{\sigma_i^{\text{test}} - \sigma_i^{\text{model}}}{\sigma_i^{\text{test}}} \right|}{m}, \quad (12)$$

式中： $m$  为采集到的试验数据个数；

$\sigma_i^{\text{test}}$  为试验测得的应力值；

$\sigma_i^{\text{model}}$  为本构模型计算得到的应力值。

拟合误差分析结果如表4所示。从表4可以看出：在应变组合①下，M-R模型和Ogden  $N=1$ 模型对材料的应力应变曲线拟合效果相比其他模型的拟合效果

更好；在应变组合②下，Yeoh模型、Van der Waals模型和Ogden  $N=3$ 模型均可以较好拟合出其应力应变曲线；在应变组合③下，M-R模型和Ogden  $N=3$ 模型可以获得较好的拟合效果。

从以上数据总体上看：在小应变条件下M-R模型和Ogden  $N=1$ 模型，相对的预测精度较其他模型更好；在中等应变条件下，Van der Waals模型可以较精确地预测微孔聚氨酯弹性材料的应力应变曲线；当应变为中等及大应变，出现较强的非线性情况下，Ogden  $N=3$ 模型和Yeoh模型可以较准确地模拟微孔聚氨酯弹性材料的应力应变。

表4 不同载荷水平试验数据拟合本构模型的平均误差

Table 4 Average errors of the fitting test data of constitutive models under different loading levels %

应变组合序号	载荷水平	平均误差						
		M-R 模型	N-H 模型	Yeoh 模型	Ogden $N=1$ 模型	Ogden $N=3$ 模型	A-B 模型	VDW 模型
①	拉伸比 (0%~25%)	15.40	28.00	27.50	12.70	19.00	28.00	28.40
	压缩比 (0%~20%)	1.80	10.30	06.40	7.50	2.20	10.30	6.50
②	拉伸比 (0%~50%)	7.30	5.60	05.60	6.60	3.90	5.60	4.75
	压缩比 (0%~40%)	10.10	15.00	03.20	14.50	5.20	15.00	3.70
③	拉伸比 (0%~75%)	8.00	14.80	13.20	10.60	6.40	14.80	13.38
	压缩比 (0%~60%)	9.50	15.80	6.69	15.30	8.10	15.80	5.90

## 4 有限元分析与试验验证

### 4.1 微孔聚氨酯弹性垫板产品实验

在南车株洲电力机车研究所有限公司新材料检测中心的300kN微机控制电子万能试验机上进行产品静刚度试验，如图7所示。试验沿垂向以  $1 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$  的速率均匀加载至 100 kN，进行3次循环加载和卸载，在第4次循环加载时，记录钢轨位移，并计算静刚度。本文取了3个微孔聚氨酯弹性垫板产品进行静刚度试验，计算其静刚度的平均值。

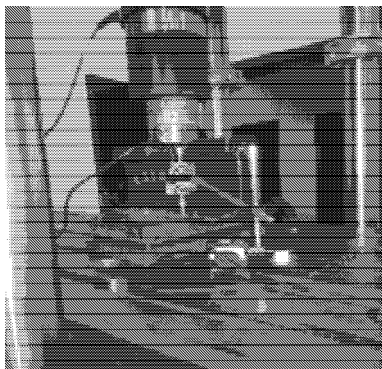


图7 产品试验图

Fig. 7 The experiment of products

### 4.2 微孔聚氨酯弹性垫板数值模拟

在Abaqus软件中，建立微孔聚氨酯弹性材料的实体网格模型，如图8所示。网格数为11472个，单元类型为C3D8H，加载方式与试验相同，垫板底部

约束，上表面垂向加载 100 kN。产品试验其应变范围为应变组合②的变形范围，故选取相应的Yeoh模型、Van der Waals模型和Ogden  $N=3$ 模型进行有限元分析。

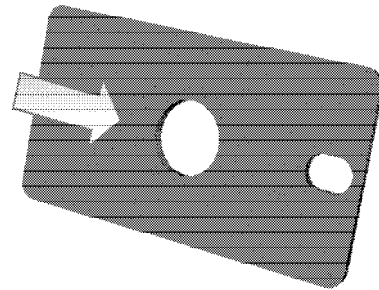


图8 微孔聚氨酯弹性垫板有限元模型

Fig. 8 The finite element model of product

图9为微孔聚氨酯弹性材料的试验和仿真的力-位移曲线对比图。

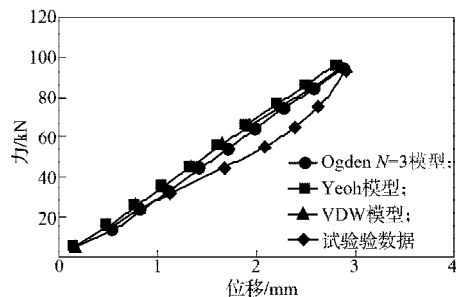


图9 仿真分析结果与试验值对比

Fig. 9 Simulation and experimental contrast

由图9可以看出：Yeoh模型、Van der Waals模

型和 Ogden  $N=3$  模型的预测值与试验值的相对误差分别为 8.44%, 7.83% 和 5.93%, 这说明试验值与模拟值吻合较好。

## 5 结论

1) 试验结果表明: 微孔聚氨酯弹性体力学性能呈现出超弹性和非线性, 其拉伸与压缩应力应变曲线明显不同, 不能用简单的线性本构关系进行描述; 微孔聚氨酯弹性体在循环加载第一次呈现较强的 Mullins 软化效应, 尤其在应变较大时更为明显。

2) 通过对试验数据进行拟合, 在小应变条件下 M-R 模型和 Ogden  $N=1$  模型, 相对的预测精度较其他模型更好; 在中等应变条件下, Van der Waals 模型可以比较精确地预测微孔聚氨酯弹性材料的应力应变曲线; 当应变为中等及大应变, 出现较强的非线性情况下, Ogden  $N=3$  和 Yeoh 模型可以较准确地模拟该材料的应力应变。

3) 通过对微孔聚氨酯弹性垫板产品的静刚度试验及其有限元仿真, 验证了经典超弹性本构模型拟合该材料的适用性, 为以后进行此类产品开发和工程应用提供了试验依据和技术支持。

## 参考文献:

- [1] 卢祖文. 解决关键技术发展无碴轨道[J]. 中国铁路, 2005(1): 16-19.  
Lu Zuwen. Resolve the Key Technology and Develop Ballastless Track[J]. Chinese Railways, 2005(1): 16-19.
- [2] 何华武. 我国客运专线应大力发展无碴轨道[J]. 中国铁路, 2005(1): 11-15.  
He Huawu. Ballastless Track Should Be Developed in Great Efforts on Chinese Passenger Dedicated Lines[J]. Chinese Railways, 2005(1): 11-15.
- [3] 何华武. 无碴轨道技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005: 11-12.  
He Huawu. Ballastless Track Technology[M]. Beijing: Chinese Railways Press, 2005: 11-12.
- [4] 罗玉媛, 唐庆功, 刘佳, 等. WJ-8扣件系统中弹性垫板的应力松弛性能研究[J]. 化工新型材料, 2012, 40(12): 152-154.  
Luo Yuyuan, Tang Qinggong, Liu Jia, et al. Study on Stress Relaxation Characteristics of Elastic Pad in WJ-8 Fastener System[J]. New Chemical Materials, 2012, 40(12): 152-154.
- [5] 周志强. 聚氨酯微孔弹性轨下垫板的应用研究[J]. 世界橡胶工业, 2012, 39(9): 35-38.  
Zhou Zhiqiang. Study of Application of Polyurethane Microcellular Elastic Rail Pad[J]. World Rubber Industry, 2012, 39(9): 35-38.
- [6] 秦培成, 查晓熊, 于航. 聚氨酯硬质泡沫材料本构研究及其在夹芯板中的应用[J]. 工业建筑, 2008, 38(7): 77-81.  
Qin Peicheng, Zha Xiaoxiong, Yu Hang. Study on Polyurethane Foam Material Constitutive Relation and It's Application in Sandwich Panels[J]. Industrial Construction, 2008, 38(7): 77-81.
- [7] 王亚萌. 轿车用微孔聚氨酯减振缓冲块[J]. 汽车与配件, 2001(23): 26-28.  
Wang Yameng. Microcellular Polyurethane Damping Cushion Block for Cars[J]. Automobile & Parts, 2001(23): 26-28.
- [8] Arruda E M, Boyce M C. Abaqus Analysis User's Manual Volume V: Prescribed Conditions, Constraints & Interactions[G/OL]. [2014-06-21]. <http://abaqusdoc.ugalaxy.ca/>.
- [9] Boyce M C, Arruda E M. Constitutive Models of Rubber Elasticity: A Review[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2000, 73(3): 504-522.
- [10] Rivlin R S, Saunders D W. Large Elastic Deformations of Isotropic Materials VII: Experiments on the Deformation of Rubber[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 1951, 243(865): 251-288.
- [11] Yeoh O H, Fleming P D. A New Attempt to Reconcile the Statistical and Phenomenological Theories of Rubber Elasticity[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 1997, 35(12): 1919-1931.
- [12] Ogden R W. Large Deformation Isotropic Elasticity - on the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids[C]//Mathematical, Physical and Engineering. Great Britain: The Royal Society, 1973, 46(2): 398-416.
- [13] 张少实, 庄茁. 复合材料与粘弹性力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 175-176.  
Zhang Shaoshi, Zhuang Zhuo. Composite Materials and Viscoelastic Mechanics[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005: 175-176.

(责任编辑: 邓彬)