

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.01.003

# 橡胶弹性元件低温刚度预测方法

穆龙海<sup>1,2</sup>, 丁智平<sup>1</sup>, 黄友剑<sup>2</sup>, 卜继玲<sup>2</sup>, 曾家兴<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:** 在 20, 0, -10, -20, -30, -40 °C 下, 对橡胶材料进行单轴拉伸试验, 采用 4 种常用类型本构模型拟合试验数据, 得出不同温度下的模型参数, 并利用拟合优度对模型拟合效果进行评估, 结果表明 Ogden 3 和 4 阶模型拟合效果最好。分别考虑环境温度以及温度场的改变 (从室温 20 °C 逐步降低至 -40 °C) 对橡胶力学性能的影响, 对锥形橡胶弹簧在各试验温度下施加垂向载荷的刚度进行预测, 并对产品进行相应的刚度试验。试验结果表明, 仿真分析中若考虑温度场的改变对橡胶力学性能的影响, 刚度预测精度显著提高; 在环境温度低于 -20 °C 时, 仿真分析有必要考虑温度场的变化而产生的热应力对橡胶弹性元件刚度的影响。

**关键词:** 橡胶弹性元件; 单轴拉伸试验; 低温; 静刚度

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2016)01-0011-06

## The Method of Stiffness Prediction of Rubber Elastic Elements in Low Temperature

MU Longhai<sup>1,2</sup>, DING Zhiping<sup>1</sup>, HUANG Youjian<sup>2</sup>, PU Jiling<sup>2</sup>, ZENG Jiaying<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:** Uniaxial tensile tests were conducted on rubber materials at the temperatures of 20, 0, -10, -20, -30 °C and -40 °C. The test data were fitted with four common hyperelastic constitutive models, the constitutive model parameters at different temperatures were obtained, and the fit goodness were used to evaluate the fitting effects of the models. The results show that Ogden ( $N=3$ ,  $N=4$ ) models have better fitting effects. The impacts of ambient temperature and the change of the temperature field (from room temperature 20 °C reducing to -40 °C gradually) on mechanical property of rubber materials were considered, the stiffness prediction of cone-shape spring under perpendicular loads were conducted at various testing temperatures, and the corresponding stiffness tests were made on products. The test results show that the stiffness prediction accuracy has a significantly increasing if the impact of the temperature field change on mechanical property of rubber materials was considered in simulation analysis. At the the ambient temperature less than -20 °C, it is necessary to consider the impact of thermal stress in the temperature field change on the stiffness prediction of rubber spring in simulation analysis.

**Keywords:** rubber elastic element; uniaxial tensile experiment; low temperature; static stiffness

收稿日期: 2015-12-15

作者简介: 穆龙海 (1990-), 男, 安徽宿州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为机械结构强度理论,

E-mail: 1290434980@qq.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

## 0 引言

橡胶弹性元件被广泛应用于轨道交通领域,其工作的环境温度变化较大,在冬季橡胶弹性元件的工作温度可低至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为保证橡胶弹性元件的工作可靠性,必须保证橡胶弹性元件在低温环境下的刚度满足设计要求。由于试验条件限制,工程上很少对橡胶产品进行低温静刚度试验,因此,提出一种可靠的低温刚度预测方法显得非常必要。

常温下橡胶材料的静态力学性能研究已经趋于成熟<sup>[1-4]</sup>,但低温环境下橡胶材料的静态力学性能很少有学者研究。橡胶材料的静态力学性能通常用超弹本构模型表示,为获得较精确的材料参数,许多学者进行了大量的研究。袁东野<sup>[5]</sup>进行了不同温度下的剪切实验,深入研究了橡胶材料随着温度的降低而发硬的程度对压缩弹性模量、剪切弹性模量、容许转角及容许剪切角的影响。余惠琴等<sup>[6]</sup>比较了天然橡胶与低温改性橡胶的剪切性能。王付胜等<sup>[7]</sup>通过低温试验测出了几种橡胶材料的玻璃化温度,并分析了影响橡胶胶料低温性能的配方因素。由世岐等<sup>[8]</sup>进行了低温垂向和横向的静刚度试验,研究了环境温度对叠层橡胶支座横向和垂向刚度的影响。王涛<sup>[9]</sup>进行了常温和 $196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的基础力学试验,拟合了2种温度下的超弹本构参数,并对2种环境温度下的橡胶金属复合密封机构进行了有限元分析。胡小玲等<sup>[10]</sup>对3类基本试验不齐全情况下超弹性本构模型的预测能力和模型选取策略进行了探讨。

环境温度改变对橡胶材料的力学特性影响较大,本文通过低温下的单轴拉伸试验,研究低温环境变化对橡胶材料力学性能的影响,并提出橡胶弹性元件低温刚度预测方法,以期工程设计提供借鉴。

## 1 橡胶材料的温度效应

环境温度对橡胶材料的力学性能影响如图1所示。在同等载荷水平下,随着温度的升高橡胶材料的模量减小,橡胶分子的流动性增加,在微观上呈现出不同的分子运动形式,在宏观上表现为玻璃态、橡胶态和黏流态,玻璃态和橡胶态之间称为玻璃化转变区。当橡胶材料处于玻璃态时,大分子链处于冻结状态,几乎不能运动,只有链内原子的键长、键角改变,以及某些侧基、支链和小链节的运动,链段运动的松弛时间几乎为无穷大。橡胶材料表现为虎克弹性行为,具有很高的模量。在玻璃态转变区,分子链开始解冻,大分子链运动变得活跃,开始出现链段运动,橡胶材料开始表现出阻尼特性。由于

分子间的摩擦力较大,机械能通过摩擦转变为热能,因而链段的运动具有不可逆性,除去外力后不能恢复到初始状态,表现出黏性行为。随着温度的升高进入橡胶态,分子链的运动更加自由,不断改变其构像,从卷曲状态变为伸展状态,但仍以链段运动为主,不是整个分子链的运动,未出现分子链滑移,形变具有可逆性。

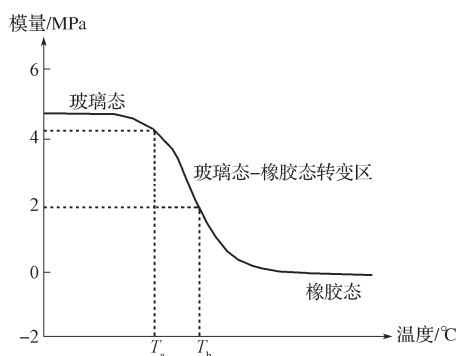


图1 模量温度曲线

Fig. 1 Modulus temperature curve

## 2 橡胶材料低温拉伸试验

橡胶弹性元件的工作环境温度最低可达 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (属于玻璃态转变区),随着温度的降低橡胶材料的力学特性变化越剧烈。为研究低温对橡胶材料力学性能的影响,本文在环境温度分别为 $20, 0, -10, -20, -30, -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时对橡胶材料进行单轴拉伸试验。

试验材料为炭黑填充橡胶,编号为FS035A,由中国中车株洲时代新材料科技股份有限公司生产。单轴拉伸试样形状如图2所示。试样在200T电磁平板硫化机上制备,硫化温度为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,硫化压力为 $21\text{ MPa}$ ,硫化时间为 $15\text{ min}$ 。试验前试样在环境温度为 $(23 \pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的室内调节 $6\text{ h}$ ,室内湿度为 $50\%$ ,试样标距长度为 $25\text{ mm}$ 。

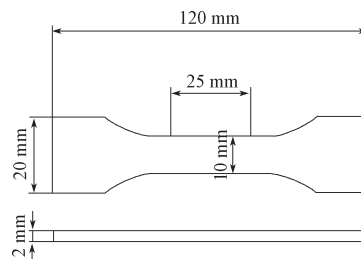


图2 单轴拉伸试验试样

Fig. 2 Specimen for uniaxial tensile experiment

试验在CMT 4204电子万能试验机(深圳市三思纵横科技股份有限公司)上进行,试验温度依次为 $20, 0, -10, -20, -30, -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,采用液氮进行降温,待温度降至指定温度后保温 $5\sim 10\text{ min}$ ,拉伸速率为 $6\text{ mm/min}$ 。为消

除偶然因素的影响,每个温度进行3次试验取平均值,得出不同温度下的应力-应变关系曲线如图3所示。

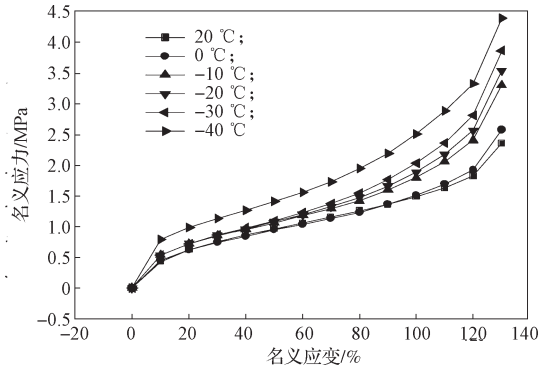


图3 不同温度下的应力-应变曲线

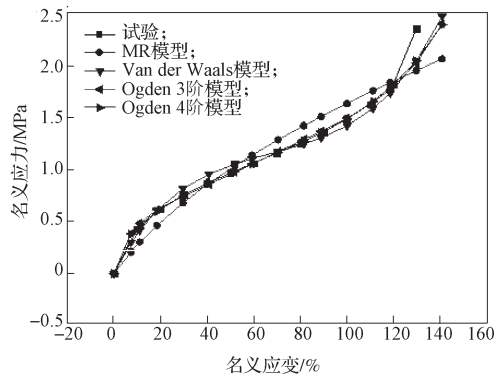
Fig. 3 Stress-strain curves at different temperature

从图3可以看出,橡胶材料的应力-应变关系具有较强的非线性,且随温度的降低,橡胶材料的拉伸弹性模量呈增大的变化趋势。

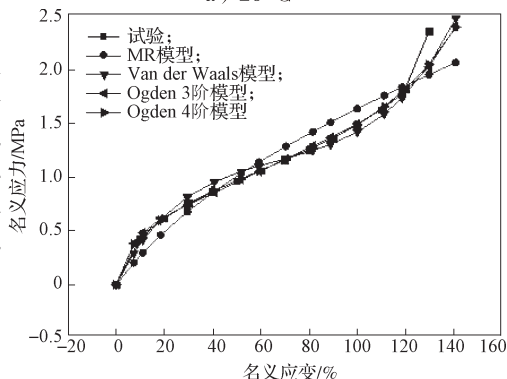
### 3 低温超弹本构拟合

#### 3.1 本构模型参数拟合

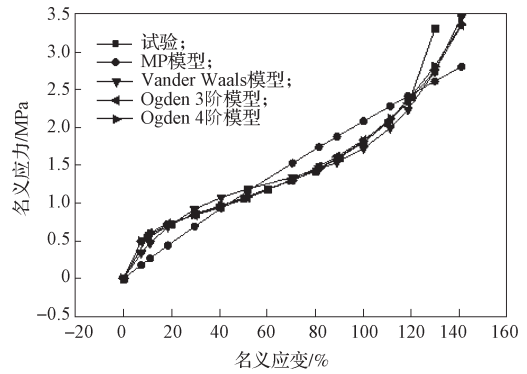
橡胶材料力学性能描述常用的本构模型有Mooney-Rivlin (MR)、Ogden、Van der Waals。本文选择Mooney-Rivlin、Ogden 3阶、Ogden 4阶、Van der Waals 4种本构模型分别对20, 0, -10, -20, -30, -40 °C下的单轴拉伸试验数据进行最小二乘拟合,结果如图4所示。



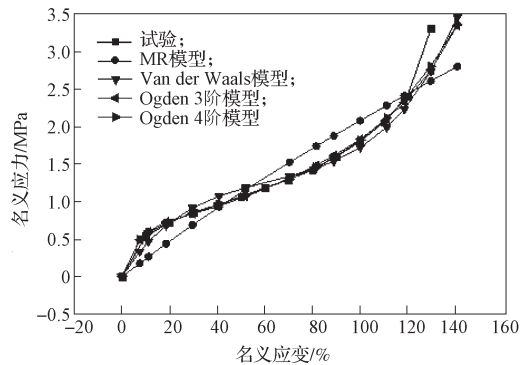
a) 20 °C



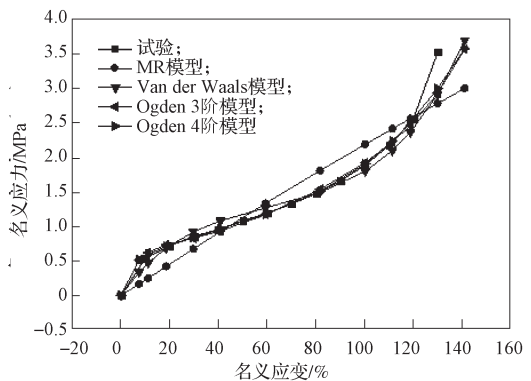
b) 0 °C



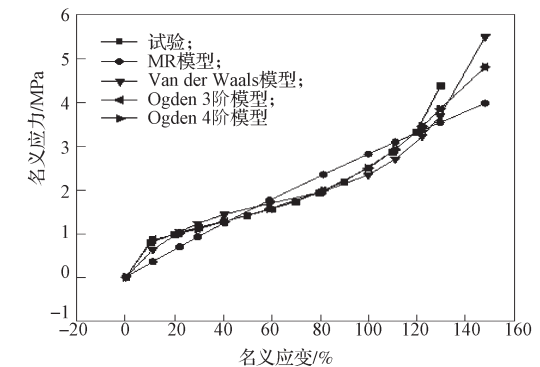
c) -10 °C



d) -20 °C



e) -30 °C



f) -40 °C

图4 单轴拉伸试验数据拟合结果

Fig. 4 Results of uniaxial tensile test data fitting

#### 3.2 拟合优度

文献[11]提出采用拟合优度  $R^2$  来评估本构模型的拟合误差,其表达式为

$$R^2 = 1 - SS_{\text{err}} / SS_{\text{tot}}, \quad (1)$$

$$SS_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2, \quad (2)$$

$$SS_{\text{err}} = \sum_{i=1}^N (\hat{P}_i - P_i)^2, \quad (3)$$

式(1)~(3)中:  $SS_{\text{err}}$  表示残差;  $SS_{\text{tot}}$  表示偏差;  $P_i$  为试验值;  $\bar{P}$  为  $P_i$  的平均值;  $\hat{P}_i$  为模型拟合值;  $N$  为参与拟合的试验数据点的数量。

$R^2$  越大, 说明模型的整体拟合优度越高, 误差越小, 4 种模型的拟合优度如表 1 所示。

由表 1 可知, 在整个试验温度范围内, Ogden 3 阶和 Ogden 4 阶模型对单轴拉伸试验数据的拟合效

果较好, 且 Ogden 3 阶和 Ogden 4 阶拟合效果相近。故选择 Ogden 3 阶模型作为该橡胶材料的本构模型, 该材料在各个温度下的本构参数如表 2 所示。

表 1 4 种本构模型的拟合优度

Table 1 The fitting goodness of 4 constitutive models

温度 / ℃	模 型			
	Mooney-Rivlin	Ogden 3 阶	Ogden 4 阶	Van der Waals
20	0.957 0	0.991 2	0.993 5	0.957 7
0	0.946 2	0.992 1	0.993 1	0.953 3
-10	0.953 1	0.991 4	0.997 8	0.961 2
-20	0.960 1	0.995 8	0.998 2	0.965 4
-30	0.952 4	0.991 7	0.995 4	0.957 8
-40	0.961 8	0.993 2	0.994 2	0.967 4

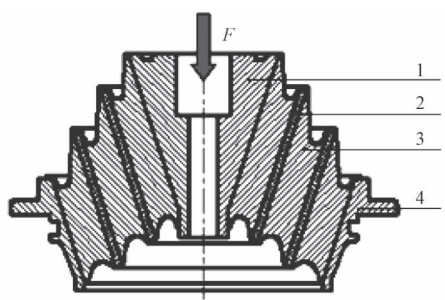
表 2 不同温度下的本构模型参数

Table 2 Parameters of constitutive models at different temperature

温度 / ℃	参 数					
	$\mu$			$\alpha$		
20	-1.531 2	0.709 6	2.847 7	6.237 7	6.840 1	-9.456 0
0	-4.636 9	2.428 3	5.529 1	6.687 6	7.064 4	-11.678 7
-10	-4.104 5	1.727 5	5.927 7	6.383 9	6.884 6	-11.223 0
-20	-5.819 9	3.047 6	6.646 9	6.746 8	7.088 0	-12.061 0
-30	1.171 2	-5.008 1	10.023 0	1.106 5	12.500 7	-25.000 0
-40	1.439 3	6.724 6	13.456 6	1.024 0	12.500 0	-24.998 9

## 4 锥形簧低温刚度预测

锥形簧能适应复杂多变的工作环境, 从而被广泛应用于轨道车辆的减振系统中。图 5 为锥形簧剖面图, 其中填充橡胶材料胶料硬度为邵氏 62°, 金属构架材料为 45 号钢。



1—芯轴; 2—隔板; 3—橡胶; 4—外套

图 5 锥形簧剖面图

Fig. 5 The profile of cone-shape spring

考虑环境温度对橡胶材料静态性能的影响, 本研究采用 2 种方法对锥形簧进行有限元仿真, 预测垂向载荷为 60 kN, 温度分别为 20, 0, -10, -20, -30, -40 °C 工况下的静刚度。

方法 1: 考虑环境温度对材料的静态性能的影响, 采用各个温度下橡胶材料的材料参数进行仿真,

直接预测出锥形簧的刚度, 仅需要 1 个分析步进行垂向加载。

方法 2: 考虑温度由常温 (20 °C) 逐渐降低带来的温度热应力的影响, 分 2 个分析步进行分析, 其中第一个分析步用于仿真温度从常温 (20 °C) 降低至各个温度点引起的温度热应力; 第二个分析步用于仿真垂向加载 60 kN 后的形变位移。

### 4.1 有限元模型

考虑结构和载荷的对称性, 为简化计算量, 选择轴对称模型进行有限元分析。利用 Hypermesh 软件划分网格, 然后导入 ABAQUS 中进行求解分析, 建立如图 6 所示的有限元模型。

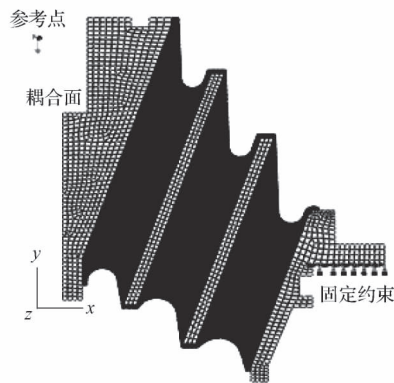


图 6 锥形簧有限元模型

Fig. 6 FEM model of cone-shape spring



4.2 材料参数

由于环境温度变化(20~-40℃)对金属材料力学特性影响较小,故2种方法下金属材料的杨氏弹性模量均为210 GPa,泊松比均为0.3。

方法1中,橡胶材料取表2中各温度点下的材料参数。方法2中,橡胶材料参数如表2中常温(20℃)至各个温度点的本构参数,同时金属线膨胀系数为 $4.72 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,橡胶线膨胀系数为 $1.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

4.3 载荷边界条件

如图6所示,在外套支撑端面施加固定约束,在芯轴中心处建立参考点,将参考点与芯轴孔耦合。

方法1直接对参考点施加y轴负方向大小为60 kN的集中力。

方法2在第一个分析步中施加温度场,从20℃降低至各个温度点,第二个分析步中对参考点施加y轴负方向大小为60 kN的集中力。

4.4 仿真结果

分别采用2种方法对锥形簧进行有限元仿真,所得刚度预测结果如表3所示,刚度与温度的关系曲线如图7所示。

表3 2种方法下刚度预测结果

Table 3 The stiffness predicted results by two methods  
kN/mm

方法	温度/ $^{\circ}\text{C}$					
	20	0	-10	-20	-30	-40
1	5.68	8.21	8.40	9.10	15.5	18.12
2	5.68	8.44	8.77	9.69	17.9	21.40

由图7可知,方法2预测的刚度大于方法1所预测的刚度,且随着环境温度的降低,二者之间的差距呈增大趋势。

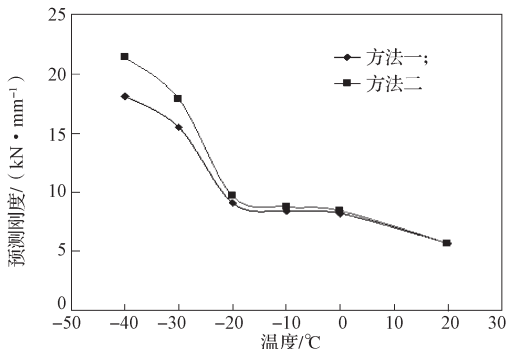


图7 预测刚度-温度的关系曲线

Fig. 7 The relationship curve of predicted stiffness-temperature

5 锥形簧刚度的试验验证

5.1 试验

为了消除加工时产生的内应力,试验前产品试

样需在(23±2)℃环境温度下至少放置24 h。考虑残余变形的影响及橡胶材料的恢复能力,静刚度试验应先进行高温下的刚度试验再进行低温下的刚度试验,即依次进行20,0,-10,-20,-30,-40℃下的刚度试验,2次试验之间间隔1 h。试验前将产品放入低温箱进行降温,待温度降低至各个温度点后保温20 min,然后施加大小为60 kN的垂向载荷,为去除Mullins效应的影响,循环加载5次,取第4次加载曲线为试验刚度曲线。

试样在各温度下的试验结果如表4所示。由表4可知,温度由常温(20℃)降低至-10℃,刚度增加了49%;温度降低至-30℃,刚度增加了188%;温度降低至-40℃,刚度增加了240%。

表4 各温度下的刚度试验结果

Table 4 The result of stiffness experiments

温度/ $^{\circ}\text{C}$	20	0	-10	-20	-30	-40
刚度/( $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	5.97	8.70	8.88	9.80	17.20	20.30

5.2 有限元仿真验证

将试验结果与4.4节中2种方法下的仿真结果进行对比,计算2种仿真方法的相对误差,结果如表5所示。由表5可知,2种方法的预测精度都能够满足工程使用要求,方法2的预测精度高于方法1的预测精度,尤其是在环境温度低于-10℃的情况下。当环境温度高于-20℃时,方法1的预测精度较高(相对误差≤6%),随着温度的降低,方法1预测误差总体呈增大趋势。方法2的预测相对误差均小于6%,预测精度较高。对比方法1和方法2的相对误差可知,当环境温度低于-20℃时,必须考虑温度场变化产生的温度热应力影响。

表5 仿真误差

Table 5 The simulation error

温度/ $^{\circ}\text{C}$	试验	方法1 预测		方法2 预测	
	刚度/ ( $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	刚度/ ( $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	相对误差/ %	刚度/ ( $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	相对误差/ %
20	5.97	5.68	4.76	5.68	4.76
0	8.70	8.21	5.56	8.44	2.91
-10	8.88	8.40	5.39	8.77	1.25
-20	9.66	9.10	7.15	9.69	1.14
-30	17.20	15.50	9.86	17.90	4.07
-40	20.30	18.12	10.72	21.40	5.42

6 结论

根据前面的试验和分析可得如下结论:

1) 对橡胶材料在环境温度分别为20,0,-10,-20,-30,-40℃,应变范围为0~150%下的拉伸试验,选

择 4 种常用本构模型拟合试验数据, 得出材料在不同温度下的本构参数。比较不同本构模型的拟合效果, 结果表明在各试验温度下 Ogden 3 阶模型和 Ogden 4 阶模型的拟合精度较高。

2) 对锥形簧分别在温度为 20, 0, -10, -20, -30, -40 °C 下施加 60 kN 垂向载荷的产品刚度试验。结果表明, 温度由常温 (20 °C) 降低至 -10 °C, 刚度增加了 49%; 温度降低至 -30 °C, 刚度增加了 188%; 温度降低至 -40 °C, 刚度增加了 240%。

3) 分别考虑环境温度以及因温度场的改变而产生的热应力对橡胶力学性能的影响, 对锥形簧在各试验温度下施加 60 kN 垂向载荷进行有限元仿真, 对其刚度进行预测。将有限元仿真的刚度预测值与试验结果进行对比, 结果表明考虑温度场的改变对橡胶力学性能的影响, 刚度预测精度显著提高, 相对误差小于 6%。在环境温度低于 -20 °C 时, 仿真分析有必要考虑温度场的变化而产生的热应力对橡胶弹性元件刚度的影响。

#### 参考文献:

- [1] 丁智平, 陈吉平, 宋传江, 等. 橡胶弹性减振元件疲劳裂纹扩展寿命分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(22): 58-64.  
DING Zhipin, CHEN Jipin, SONG Chuanjian, et al. Analysis of Fatigue Crack Growth Life for Rubber Vibration Damper[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(22): 58-64.
- [2] MARS W V, FATEMI A. A Literature Survey on Fatigue Analysis Approaches for Rubber[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(9): 949-961.
- [3] SAINTIER N, CAILLETAUD G, PIQUES R. Multiaxial Fatigue Life Prediction for a Natural Rubber[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(5): 530-539.
- [4] 上官文斌, 吕振华. 汽车动力总成橡胶隔振器弹性特性的有限元分析[J]. 内燃机工程, 2003, 24(6): 50-55.  
SHANGGUAN Wenbin, LU Zhenhua. Finite Element Analysis of Elastic Characteristics of Rubber Isolator for Automotive Powertrain Systems[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2003, 24(6): 50-55
- [5] 袁东野. 寒区桥梁板式橡胶支座低温性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.  
YUAN Dongye. Bridge Rubber Bearing Performance at Low-Temperature in Cold Region[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
- [6] 余惠琴, 刘晓红. 低温改性天然橡胶剪切性能研究[J]. 固体火箭技术, 2006, 29(3): 222-224.  
YU Huiqin, LIU Xiaohong. Study on Shear Properties of Low-Temperature Modified Nature Rubber[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2006, 29(3): 222-224.
- [7] 王付胜, 高新文, 曹江勇, 等. 轨道车辆用耐低温橡胶减振元件的研究[J]. 铁道车辆, 2012, 50(11): 22-25  
WANG Fusheng, GAO Xinwen, CAO Jiangyong, et al. Research on Low Temperature Resistant Rubber Damping Elements for Rail Vehicles[J]. Rolling Stock, 2012, 50(11): 22-25.
- [8] 由世岐, 刘 斌, 楼永林. 低温环境对叠层橡胶支座变形特性影响的试验研究[J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2005, 26(3): 297-299.  
YOU Shiqi, LIU Bing, LOU Yonglin. Low-Temperature Effect on Deformation Behavior of Laminated Rubber Isolators[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2005, 26(3): 297-299.
- [9] 王 涛. 常温和超低温橡胶金属复合密封机构的有限元分析与优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.  
WANG Tao. Finite Element Analysis and Structure Optimal Design for Composite Seal of Rubber and Material at Room Temperature and Low Temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [10] 胡小玲, 刘 秀, 李 明, 等. 炭黑填充橡胶超弹性本构模型的选取策略[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 34-42.  
HU Xiaoling, LIU Xiu, LI Ming, et al. Selection Strategies of Hyperelastic Constitutive Models for Carbon Black Filled Rubber[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(5): 34-42.
- [11] 卜继玲, 黄友剑. 轨道车辆橡胶弹性元件设计计算方法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010: 41-63.  
BU Jiling, HUANG Youjian. The Method to Design Rubber Elastic Elements for Rail Vehicles[M]. Beijing: Chinese Railways Press, 2005: 41-63.

(责任编辑: 邓光辉)