

# 橡胶轴箱弹簧垂向刚度及蠕变特性的研究

荣继刚,黄友剑,张亚新,刘建勋

(株洲时代新材料科技股份有限公司,株洲 412007)

**摘要:**橡胶轴箱弹簧具有典型的压剪复合橡胶/金属结构,设计时需要确保其结构形成良好的垂向刚度。正常工作时,因承载所形成的蠕变量应控制在设计范围。为此,利用有限元分析技术对某型橡胶轴箱弹簧的垂向刚度特性、垂向蠕变量进行了有限元计算,获得了良好的计算结果。

**关键词:**橡胶;刚度;应力松弛;蠕变

**中图分类号:** TQ330.4<sup>+</sup>92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-4030(2009)02-0060-03

橡胶轴箱弹簧主要应用于机车车辆系悬架,起弹性支撑作用,并提供一定的刚度效应,但由于橡胶材料的粘弹效应,橡胶轴箱弹簧的垂向刚度随载荷的增加而产生一定的非线性变化,同时,在恒定载荷或者变载荷作用下,橡胶轴箱弹簧随着时间的延长会产生一定的蠕变效应,其蠕变效应会影响产品的使用状态,因此,成功地预测出橡胶轴箱弹簧的垂向非线性特性和蠕变效应,是开发设计轴箱弹簧的前提和保证。

## 1 轴箱弹簧的承载结构

橡胶轴箱弹簧主要承受垂向载荷作用,为确保其承载可靠性,轴箱弹簧基本承载结构为压剪复合结构<sup>[1]</sup>,一方面通过剪切效应提供大变形量,另一方面通过压缩效应提供一定的非线性承载能力,从而使得变形与承载能力达到一个较好的匹配效果。

另外,为了提高结构的可靠性及承载能力,通常将轴箱弹簧设置为多层橡胶压剪复合结构(见图1),并使每一层橡胶材料的承载应力基本相同,从而使每层橡胶材料都具有基本相同的使用寿命。同时,将单层橡胶结构设置为多层结构,可使轴箱弹簧的横、纵2个方向的刚度达到设计要求,从而确保使用轴箱弹簧时可以获取良好的动力学性能要求。

收稿日期:2009-01-24

作者简介:荣继刚(1976-),男,湖南岳阳人,工程师,主要研究方向为机车车辆减振器件。

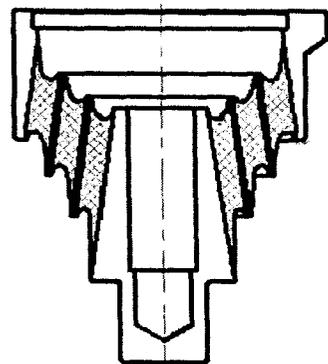


图1 轴箱弹簧示意结构

## 2 橡胶的粘弹特性

从轴箱弹簧的设计及分析角度来讲,橡胶材料的超弹特性和粘弹特性是橡胶材料的基本特性,也是控制和影响轴箱弹簧刚度及蠕变特性的关键因素,本研究所用的橡胶超弹数据和粘性数据在美国 AXEL 实验室完成测试。

### 2.1 橡胶的超弹特性

橡胶弹性又称为超弹特性,即材料在任意加载类型、载荷大小的作用下,均呈现为弹性,而且橡胶材料不同于普通金属材料,其拉伸、压缩、剪切特性是非线性的,而且是相对独立的,因此要全面描述橡胶材料的力学性能,需要获取拉伸、压缩、剪切等的应力应变实验数据<sup>[2]</sup>。在橡胶悬架元件承载变形的有限元模拟中,需要选择合适的

材料模型进行拟合。

图 2 是分析橡胶轴箱弹簧垂向刚度所用的橡胶材料基础实验数据。通过选择不同超弹本构模型进行拟合,确认选择 Van der Waals 本构形式。对本研究课题所用的这组橡胶材料数据进行拟合(见公式 1),能获得最佳的拟合效果,拟合得到的用于有限元分析所需要的材料参数见表 1。公式 1 中  $\mu$  为初始剪切模量,  $D$  为可压缩性,  $M_1$  A Lam 描述材料的弹性行为, Beta 描述材料的可压缩性能。

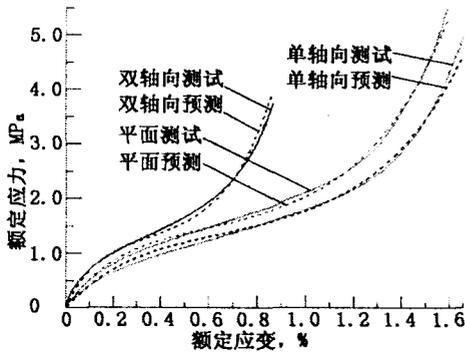


图 2 橡胶材料的弹性特征曲线

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

表 1 材料的弹性系数

超弹模型	弹性系数
Van der Waals 形式	$M_1 = 1.65(\text{MPa}); \text{Beta} = 7.5 \times 10^{-2}(\text{mm}^2/\text{N})$ $A = 1.1(\text{MPa}); \text{Lambdam} = 3.74(\text{MPa})$

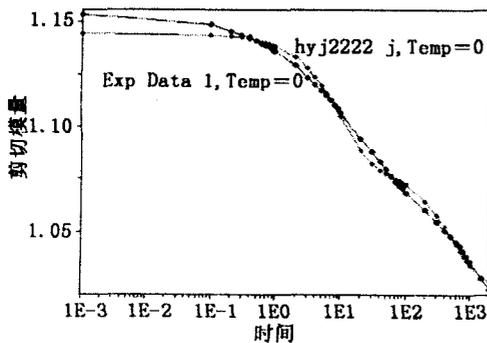


图 3 橡胶材料的粘性特征曲线

### 2.2 橡胶的应力松弛效应

轴箱弹簧所用的橡胶材料是一种典型的粘弹性材料,在静态或动态承载过程中,橡胶材料呈现出粘性及弹性双重特性。宏观上粘性往往表现为

蠕变、应力松弛、玛琳效应等迟滞特性,而在微观上粘性则表现为应力(或应变)随时间变化的函数。在恒定应变下应力随时间的延长而减小的现象或过程,称为应力松弛。研究橡胶轴箱弹簧的承载特性,需要对其蠕变特性进行理论预测,以使设计开发出来的产品其蠕变量是在其可控范围内,设计结构可确保满足其设计要求。

图 3 是分析橡胶轴箱弹簧垂向蠕变特性所用的橡胶材料应力松弛基础实验数据,通过选择不同阶数的 Prong 本构模型进行拟合(见公式 2),确认选择 4 阶形式的本构模型对材料数据进行拟合,能获得最佳拟合效果,拟合得到的用于预测轴箱弹簧蠕变特性所需要的材料参数见表 2。公式 2 中  $T_0(t)$  为瞬态剪切应力;  $g_R$  为剪切模量,  $\text{Tau}$  为瞬态时间。

$$T(t) = T_0(t) - \int_0^t g_R(S) t_0(t-s) ds \quad (2)$$

表 2 材料的粘性系数

g-i Prong, MPa	Tau-i Prong, s
1 1.051e-02	0.306
2 2.736e-02	5.309
3 3.36e-02	45.674
4 4.71e-02	1109.3

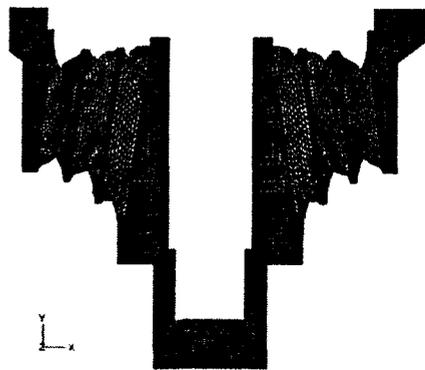


图 4 元件变形云图

### 3 某型轴箱弹簧刚度及蠕变特性预测

#### 3.1 垂向刚度的非线性特性

在产品的设计阶段需要对轴箱弹簧的垂向刚度进行预测,以确保结构能够达到产品的设计要求:设计的结构要求在垂向载荷为 21kN 时,刚度特性曲线出现第 1 个拐点;在垂向载荷为 31kN 时,刚度特性曲线再次出现又一拐点,这种能同时满足双拐点的刚度特性曲线是结构设计的难点及关

键。图4为轴箱弹簧在垂向载荷达到极限状态下67mm时的主应变分布云图。

图5是利用有限元分析得到的载荷位移曲线出现刚度拐点时的载荷与挠度关系。通过分析,可知这种压剪复合结构的橡胶轴箱弹簧,能够实现双拐点效果的刚度特征曲线(见表3)。

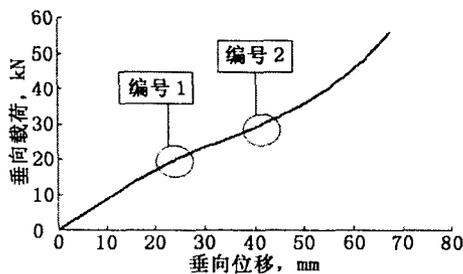


图5 垂向双拐点刚度特性曲线

表3 刚度出现拐点时的载荷与挠度关系

拐点编号	刚度曲线产生拐点时	
	载荷, kN	挠度, mm
1	21	27
2	30	41

### 3.2 不同载荷下的蠕变特性

橡胶轴箱弹簧在长期承载过程中,因材料存在粘性效应使其垂向结构高度随时间延长而不断降低。因此,在设计阶段准确地预测并使轴箱弹簧在额定载荷下的蠕变量控制在可行范围是产品设计是否成功的关键。

轴箱弹簧垂向蠕变量主要有2类:1是空车状态下的垂向蠕变量;2是在重载状态下的垂向蠕变量。表4是利用分析技术预测得到的轴箱弹簧在空、重2状态下结构的稳态蠕变量。

表4 垂向蠕变量与载荷的关系

载荷, kN	蠕变量, mm	承载状态
14	1.5	空车
28	3.4	重车

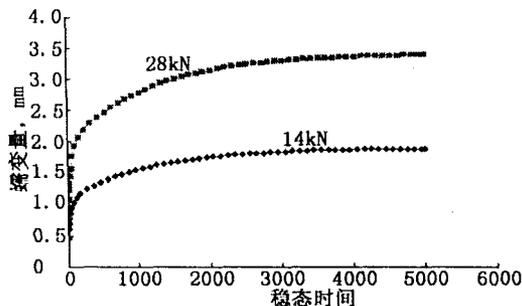


图6 垂向蠕变特性曲线

根据图6,压剪复合结构的橡胶轴箱弹簧,其

垂向蠕变量随垂向载荷的增加而增加,在重车状态下其稳态蠕变量也仅为3.4mm,而且通过数据对比,蠕变量与载荷具有一定的线性关系,而且随着载荷的增加蠕变量的增加率会越来越大,因此,轴箱弹簧在过载下的蠕变效应会更加严重。

## 4 实验验证

本课题所探讨的这款轴箱弹簧,其2个重要指标为刚度特征及蠕变效应,为确保这2个指标满足设计要求,特对其进行实验验证(见图7),实验结果与分析结果见表5。

表5 实验结果与分析结果对比

指标	分析, mm	实验, mm
垂向挠度	27/41	30/44
稳态蠕变量	1.5/3.4	1.9/4.0

通过分析实验结果对比,垂向刚度误差量最大为10%,垂向蠕变最大误差量为21%,表明精确预测蠕变特性比预测刚度特性难度更大。



图7 轴箱弹簧垂向特性实验

## 5 结论

通过对轴箱弹簧的结构、材料特性的探讨,并利用有限元分析技术对某型轴箱弹簧的垂向刚度、蠕变特性进行分析预测,其结果与实验基本吻合,对产品设计起到指导性作用,基本可得出如下结论:

(1)利用有限元技术可以预测出轴箱弹簧垂向承载特性的双刚度反S形非线性特性曲线,而分析预测得到的刚度特性曲线与实验结果吻合。

(2)利用有限元技术可以预测出轴箱弹簧垂向蠕变特性,但分析精度与刚度分析精度相比,蠕变预测的误差达到20%。

(3)橡胶轴箱弹簧在恒定垂向预载下,其蠕变量大小随垂向载荷的增加而提高,且具有一定的

线性关系,但随着载荷的增加蠕变量的增加率会越来越来大。

参考文献:

[1] 户原春彦. 防振橡胶及其应用[M]. 北京:中国铁道出版社,

1982.

[2] 危银涛,杨挺青. 橡胶类材料大变形本构关系及其有限元方法[J]. 固体力学学报,1999,20(4):281~189.

## Research on the Vertical Stiffness and the Creep of the Primary Spring

RONG Ji-gang, HUANG You-jian, ZHANG Ya-xin, LIU Jian-xun

(Zhuzhou Times New Materials Science and Technology Co. Ltd., Zhuzhou 412007, China)

**Abstract:** Rubber material had two kinds of characteristics: elasticity and viscosity. The primary spring was a typical rubber-to-metal structure to bear the compression and shear simultaneously. In design phase it must guarantee the vertical stiffness by the good structure, and control the creep due to the load under the normal working conditions. This article discussed that FEA (Finite Element Analysis) was a good tool in design to calculate the vertical stiffness and the creep for some type of the primary spring.

**Key words:** rubber; stiffness; strain relaxation; creep

(上接第 55 页)

## Preparation of Nano-Carbon Black Particles by Grafted with Small Organic Molecule in Supercritical CO<sub>2</sub> and Its Reinforcing Effect to Rubber

ZHAO Dan-dan, WANG Lin, CHEN Kai-min, XU Shi-ai, WU Chi-fei, LIU Tao, ZHAO-Ling

(East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** The modified nano-carbon black was prepared by grafting reaction with small organic molecule in supercritical carbon dioxide (scCO<sub>2</sub>). The IR spectrum of the grafted carbon black exhibited some characteristics of AO-80 molecule, and that was indicated that AO-80 was successfully grafted on the surface of carbon black. The grafting degree of the AO-80 on the carbon black, determined by thermogravimetric analysis (TGA), was about 0.8%. The particle sizes of the unmodified and the modified carbon blacks were analyzed by dynamic light scattering (DLS) and observed by TEM, it was shown that the modified carbon black (SCB) possessed a smaller average size and a narrower distribution compared with unmodified carbon black. The composites of styrene-butadiene-styrene triblock copolymer (SBS) with SCB or CB were prepared by solvent casting, and it was found that the mechanical properties of the composite were greatly improved with addition of 0.2% SCB, the elongation at break of the SCB/SBS increased 25% and the tensile strength increased 19% compared with that of pure SBS,

**Key words:** nano-carbon black; carbon black modification; rubber reinforcement; supercritical carbon dioxide; SBS