机车电传动 2017 年第 6 期 (2017-11-10)
ELECTRIC DRIVE FOR LOCOMOTIVES №6, 2017(Nov. 10, 2017)

文章编号：1000–128X(2017)06–0106–03

某型低地板车辆一系叠层橡胶簧的研制

张会杰[1]，周业明[1]，屈孝波[2]，李天一[1]

（1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 技术中心，山东 青岛 266111；
2. 株洲时代新材料科技股份有限公司 轨道交通事业部，湖南 株洲 412007）

摘 要：叠层橡胶簧的性能优劣直接关系着车辆的安全性和平稳性。介绍了一种低地板车辆用一系叠层橡胶簧的研制过程，并对一系叠层橡胶簧的结构、有限元计算进行了描述，通过刚度试验验证了有限元模型建立和计算结果的合理性和有效性。经产品刚度、蠕变及疲劳等性能试验验证了其性能完全满足设计要求。

关键词：低地板车辆；一系叠层橡胶簧；有限元计算；垂向刚度；应力应变；性能试验

中图分类号：U231；U260.331^{+}.5　　**文献标识码：**A

doi：10.13890/j.issn.1000-128x.2017.06.023

Development of Primary Laminated Rubber Spring for a Low-floor Vehicle

ZHANG Huijie[1], ZHOU Yeming[1], QU Xiaobo[2], LI Tianyi[1]

(1.Technology Center, CRRC Qingdao Sifang Locomotive Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao ,Shandong 266111, China;
2. Rail Transportation Business Unit, Zhuzhou Time New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou ,Hunan 412007, China)

Abstract: The performance of laminated rubber spring is directly related to the safety and stability of the vehicle. The development process of primary laminated rubber spring of a low-floor vehicle was introduced, and primary laminated rubber spring structure and its finite element calculation were described. The reasonability and effect of the finite element model and the calculation results were verified by stiffness test. The properties of the products were tested by the stiffness, creep and fatigue tests, and the performance of the products met the design requirements completely.

Keywords: low-floor vehicle; primary laminated rubber spring; finite element calculation; vertical stiffness; stress-strain; performance test

0 引言

低地板车辆由于其转向架结构紧凑、占用空间小，不需要在车站设置高出地面的站台或者低于地面的轨道，不会影响城市道路的总体布局，因而低地板车辆越来越受到客户的广泛关注[1–2]。低地板车辆转向架普遍采用了叠层橡胶簧作为一系悬挂，因此叠层橡胶簧的性能优劣直接关系着车辆的安全性和平稳性。

基于此，本文针对某型低地板车辆装车用一系叠层橡胶簧，从安装结构、强度计算及性能试验等方面介绍了其研发过程，以期对后续车辆关键件的研制提供技术参考。

收稿日期：2017–06–09

1 一系叠层橡胶簧的初步设计

1.1 一系叠层橡胶簧的结构

一系叠层橡胶簧由芯轴、隔套、橡胶和金属外套等组成，如图1所示。其在一定硫化条件（温度、压力及时间）经硫

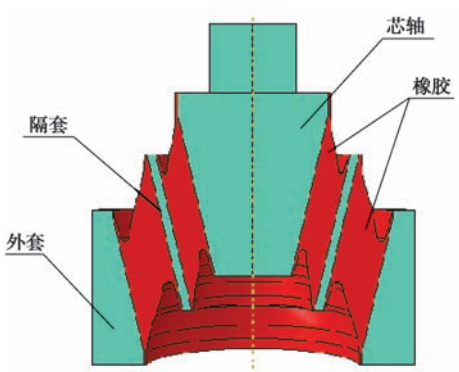


图 1 一系叠层橡胶簧结构简图

化等生产工艺加工而成，其中外套和芯轴材料为 45# 钢，隔套材料为 20# 钢，橡胶体类型为天然橡胶。

每转向架安装配有 8 套一系叠层橡胶簧，一端通过芯轴与构架连接，另一端通过外套底座与轴桥连接，如图 2 所示。低地板车辆采用低刚度的叠层橡胶簧作为定位装置，以降低车辆通过曲线时的轮轨作用力，从而提高车辆的曲线通过性能。

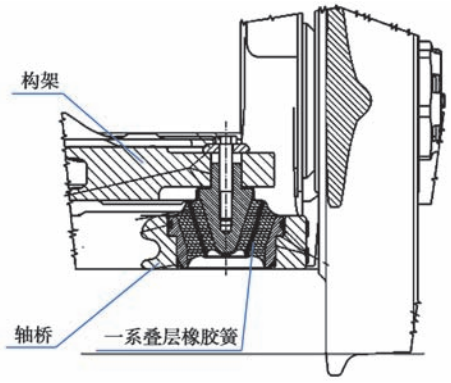


图 2　一系叠层橡胶簧安装结构简图

1.2　理论设计

根据一系叠层橡胶簧的刚度要求，对一系叠层橡胶簧的基本尺寸进行初步设计。其垂向、横向刚度计算公式分别如式（1）、式（2）[3]。

$$k=\frac{\pi l\left(R_c+r_c\right)}{h}\left(\mu_1 E\sin^2\alpha+G\cos^2\alpha\right) \quad (1)$$

式中：μ_1 为形状系数，μ_1=1+mS，m 为与橡胶材料组成有关的常数，$S=\frac{l}{2h}$；E 为橡胶弹性模数；G 为橡胶剪切模数；R_c、r_c、l、h、α 为与产品结构有关的参数。

$$k_r=\frac{\pi\left(R_c-r_c\right)}{\tan\alpha\left[\ln\left(1+\frac{2h}{R_c+r_c}\right)\right]}\left(G+E_a\right) \quad (2)$$

式中：E_a=iG，i=4+0.56kS^2，S=l/(2h)，k=10.7–0.098HS，HS 为橡胶硬度值；G 为橡胶剪切模数；R_c、r_c、l、h、α 为与产品结构有关的参数。

根据转向架的安装空间，初步选择叠层橡胶簧的尺寸如图 3 所示。

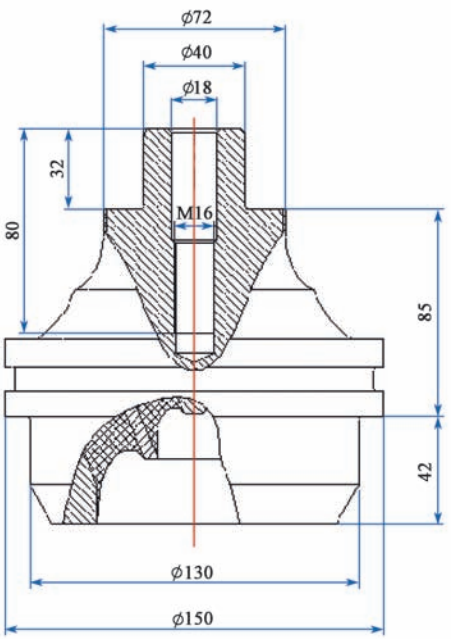


图 3　一系叠层橡胶簧示意图

一系叠层橡胶簧的垂向刚度为 1.12 kN/mm，径向刚度为 2.53 kN/mm。

2　有限元计算仿真分析

2.1　有限元模型

一系叠层橡胶簧的芯轴、隔套和金属外套部分运用 C3D8R 单元模拟其线弹特性，橡胶部分使用 C3D8H 单元模拟其超弹特性 [4]。

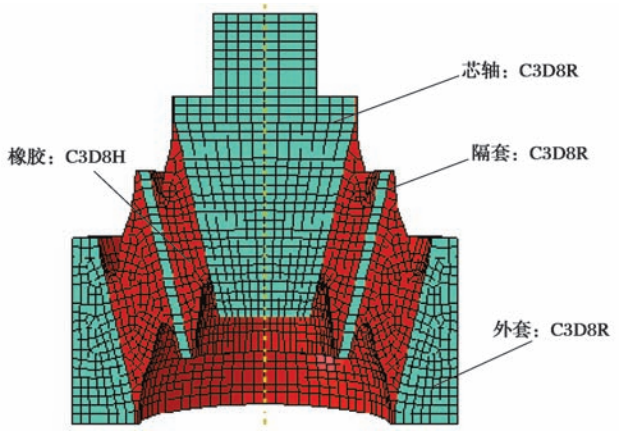


图 4　一系叠层橡胶簧有限元网格模型及其网格类型

2.2　刚度及应力应变分析结果

2.2.1　一系叠层橡胶簧刚度曲线

通过有限元模拟获得一系叠层橡胶簧的各项刚度结果如表 1 所示。

表 1　一系叠层橡胶簧的垂向特性

项点	要求	计算结果
13.6~19.6 kN 下刚度 /（kN·mm^{-1}）	1.07(1 ± 10%)	1.13
13.6~19.6 kN 下挠度 /mm	5.6（1 ± 10%）	5.3
13.6~25.5 kN 下挠度 /mm	≤ 10	9.3

通过有限元模拟获得一系叠层橡胶簧的刚度曲线如图 5 所示。

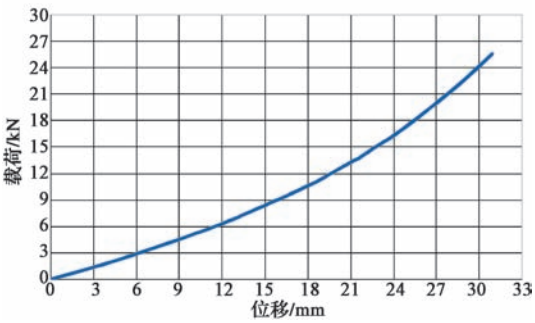


图 5　静态垂向刚度计算曲线

2.2.2　最大应力应变

通过进行有限元模拟分析，获得一系叠层橡胶簧橡胶和金属的最大应力应变结果如图 6、图 7 以及表 2 所示。

表 2　最大应力应变

项目	金属最大应力	橡胶最大应变	结论
垂向加载 25.5 kN	33.5 MPa	1.079	金属最大应力远小于材料的屈服强度，能够满足强度要求

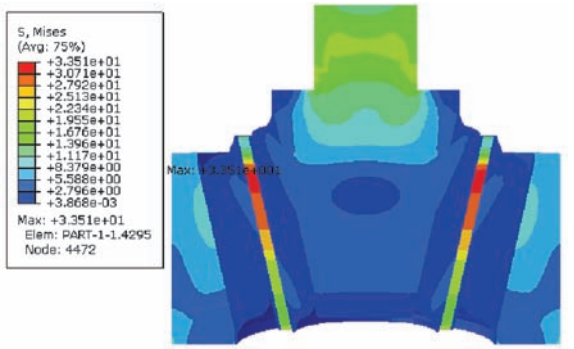


图 6　金属最大应力云图

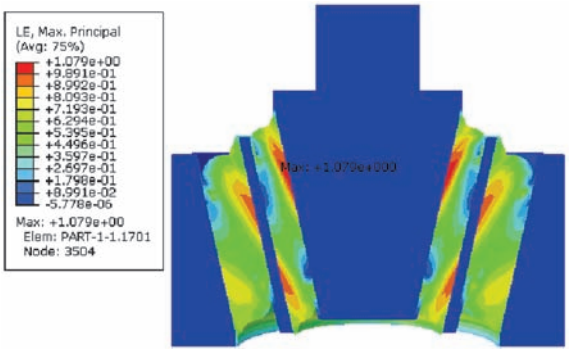


图 7　橡胶最大应变云图

3　性能试验

根据一系叠层橡胶簧的使用特性，对其刚度、蠕变及疲劳等各项性能进行试验 [5]。

3.1　静态垂向刚度试验

选取 2 套一系叠层橡胶簧按照如图 8 进行加载，在加载阶段计算在 13.6~19.6 kN 下的刚度，以及在 13.6~19.6 kN 和 13.6~25.5 kN 下的挠度。静态垂向特征试验结果如表 3 所示，静态垂向刚度试验曲线如图 9 所示，从表 3 数据和图 9 曲线可以看出，产品参数均满足设计要求。

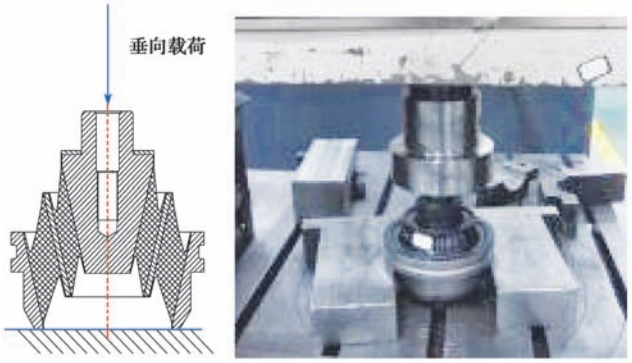


图 8　静态垂向刚度试验示意图

表 3　静态垂向特性

项目	13.6~19.6 kN 下静态垂向刚度 /（kN·mm^{-1}）	静态垂向挠度 /mm		判定
		13.6~19.6 kN	13.6~25.5 kN	
要求	（1 ± 10%）1.07	（1 ± 10%）5.6	≤ 10 mm	
1# 试验结果	1.11	5.43	9.00	合格
2# 试验结果	1.04	5.77	9.61	合格

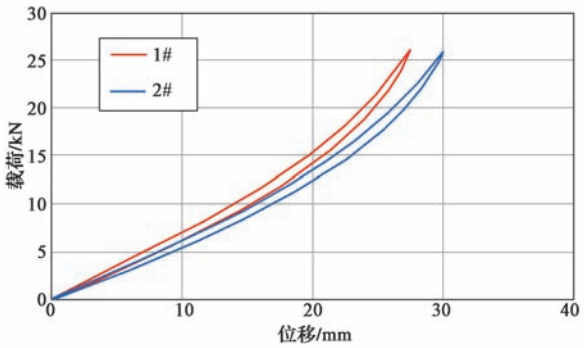


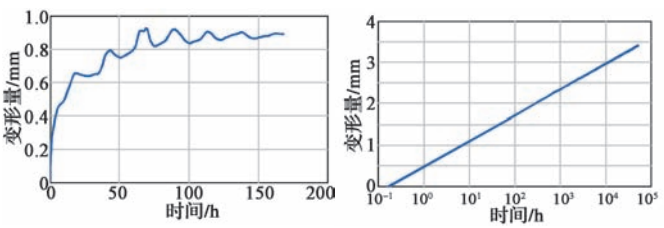
图 9　静态垂向刚度试验曲线

3.2　蠕变试验

选取 1 套一系叠层橡胶簧按照图 10 垂向加载 19.6 kN 进行蠕变测试，蠕变性能稳定后（168 h）蠕变量为 0.89 mm，预测 6 年寿命周期蠕变量为 3.4 mm，如图 11 所示，满足设计要求。



图 10　蠕变试验示意图



（a）蠕变试验曲线　　（b）预测曲线

图 11　蠕变试验曲线和预测曲线

3.3　疲劳试验

选取 1 套一系叠层橡胶簧对其在垂向载荷（19.2 ± 5.76）kN 下进行 200 万次疲劳试验，试验后检查样品完好，刚度变化不大于 15%（如图 12 所示），压缩高度变化不大于 4 mm，满足设计要求。

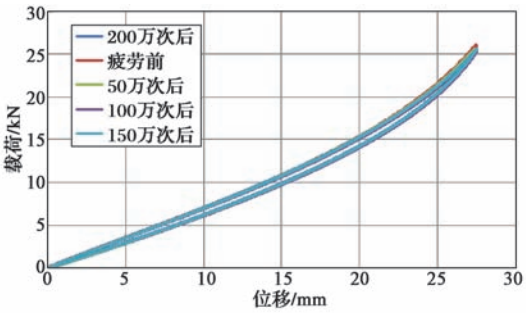


图 12　疲劳前后性能试验曲线

（下转第 113 页）