

某型低地板车辆沙漏簧国产化的研制

张会杰¹,黄江彪²,李天一¹,张雪平¹,李沛轩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:沙漏型橡胶弹簧具有刚度小、结构简单、质量轻等优点,常用于城轨低地板车辆二系悬挂系统。介绍一种低地板车辆用沙漏簧国产化研制过程,研究城轨车辆二系悬挂系统的运动机理。通过理论计算和参数选型得到适合该低地板车辆的沙漏簧,构建了沙漏簧的有限元模型,探讨了橡胶件有限元建模的规律,并通过试验验证了有限元仿真的准确性。结果表明:该沙漏簧刚度、蠕变及疲劳等性能满足设计需求。

关键词:沙漏型橡胶弹簧;低地板车辆;国产化研制;有限元仿真;性能试验

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)01-0204-05

Development of Homemade Hourglass Spring for a Low-floor Vehicle

ZHANG Huijie¹, HUANG Jiangbiao², LI Tianyi¹, ZHANG Xueping¹, LI Peixuan¹

(1. Technology Center, CRRC Qingdao Sifang Locomotive Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao 266111, China;

2. Rail Transportation Business Unit, Zhuzhou Time New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Hourglass rubber, small in stiffness, simple in structure and light in weight, is commonly used in the secondary suspension system of urban rail low-floor vehicle. This paper introduces the homemade development process of the hourglass spring for a low-floor vehicle, and studies the motion mechanism of the secondary suspension system of urban rail vehicle. The theoretical calculation and parameter selection are performed to obtain the hourglass spring suitable for the low-floor vehicle. The finite element model of the hourglass spring is constructed, and the law of finite element modeling of rubber parts is explored. Experiments are conducted to verify the accuracy of the finite element simulation, with the conclusion indicating that the stiffness, creep and fatigue properties of the developed hourglass spring meet the requirements as designed.

Keywords: hourglass rubber spring; low-floor vehicle; homemade development; finite element simulation; performance test

0 引言

城市低地板有轨电车是一个日益受到重视的城市交通工具,它具有启停频繁、车速较低、道路曲线多且曲率半径较小等特点。随着人们对环保、便利以及使用舒适度的需求越来越高,对车辆设计水平要求也更高。低地板车辆因为其结构紧凑、空间较小,又不要求站台高于地面或是轨道低于地面,既不影响道路的总体布局,而且费用较低,所以在国内各个城市的普遍使用^[1-2]。

为了满足低地板车工程设计中需要的转向架结构紧凑的特点,鉴于传统钢簧具有在3个方向上变化很大的缺点,设计人员通常选用沙漏型橡胶弹簧应用于二系悬挂设计中,称为沙漏簧。它可以在一定程度上减少转向架造价、简化走行部构造,以及为客车设计提供理想的空重车垂向柔性和横向刚度。有轨电车的普遍工作速度并不高,使用沙漏簧能够在满足二系悬挂的安装高度的同时降低车地板面高度。因此国内不少科研人员对沙漏簧进行了深入研究。赵刚强^[3]分别通过有限元分析以及现场试验的方法分析了沙漏簧的应力、应变分布以及相关的物理性

能。冯万盛等^[4]分析了沙漏簧的稳定性并探讨了弹簧结构和转向架空间布局的关系。刘兴起等^[5]以某种橡胶弹簧为例介绍了等频减振设计方法。周炜等^[6]介绍了沙漏簧的优点,分析了其结构优点以及其垂向的刚度非线性特征。陈清化等^[7]设计了一款可变刚度轴向垂向橡胶弹簧可提升车辆的运行品质。

我国早期使用的沙漏簧都从国外进口。近年来,随着橡胶冶炼技术的提升,沙漏簧实现国产化渐渐成为了可能。本文针对某型低地板车辆装车用沙漏簧进行国产化研制,从车辆性能要求、结构设计、强度计算及性能验证试验等方面研讨了其研发过程,以期对后续车辆悬挂件国产化的研制提供技术指导。

1 沙漏簧的初步设计

1.1 沙漏簧的结构特点

沙漏簧是一种由橡胶制成的弹性元件,外形基本为轴对称,主体结构由顶板、橡胶、隔板和底板等组成,如图1所示。橡胶硫化体为其核心部件,是经硫化生产工艺加工

而成,直径呈中间小两端大的形似沙漏式的结构,生产时会在弹簧内部加装支撑组件,均为金属制成,可以在轴向为弹簧起加强作用。处于上下两端的顶板和底板起连接作用,用于和车体、构架相连,与此同时,它还有限制车体极限位移的作用。

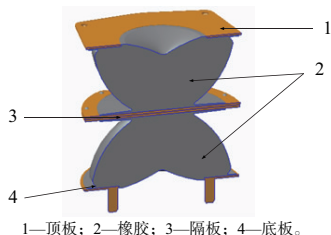


图1 沙漏簧结构简图

某低地板车辆每转向架设计装配4套沙漏簧,一端通过螺栓将顶板与车体连接,另一端连接在构架上,如图2所示。低地板车辆采用此种悬挂方式可以保证车体转角适当增大,在通过小曲线时让车辆拥有良好的动力学性能。

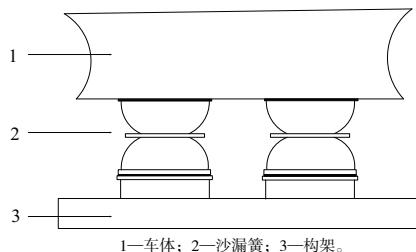


图2 沙漏簧安装结构简图

1.2 理论初步设计

根据低地板车辆设计需求,首先对沙漏簧的刚度和基本尺寸进行初步设计。沙漏簧的刚度计算公式^[8]:

垂向:

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

式中:形状系数 $\mu_1 = 1 + mS$,系数 m 是与橡胶材料组成有关的常数,面积比 $S = \frac{l}{2h}$; E 为橡胶弹性模数; G 为橡胶剪切模数; R_c 、 r_c 、 l 、 h 、 α 是与产品结构有关的参数。

径向:

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

式中: $E_a = iG$, $i = 4 + 0.56kS^2$, 而 $S = \frac{l}{2h}$, $k = (10.7 \sim 0.098)$

HS, HS 为橡胶硬度值; G 为橡胶剪切模数; R_c 、 r_c 、 l 、 h 、 α 是与产品结构有关的参数。

参考结构设计要求,拟选用的橡胶簧尺寸如图3所示。

沙漏簧的设计垂向刚度为:450(1±10%)N/mm(13.5~23.5kN)、750(1±10%)N/mm(24.5~34.5kN)。

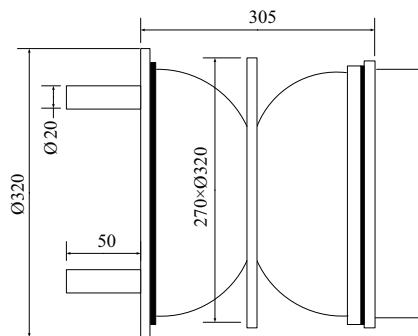


图3 沙漏簧示意图

2 有限元计算仿真分析

2.1 沙漏簧的非线性有限元模型

沙漏簧的顶板、隔板和底板部分运用 C3D8R 单元模拟其 Q345B 材料的线弹性特性,橡胶体部分使用 C3D8H 单元模拟其超弹特性,如图4所示。

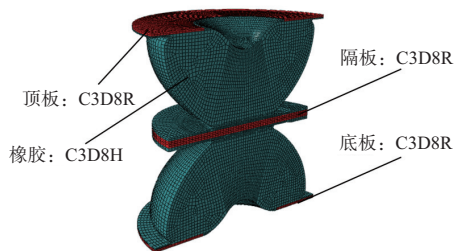


图4 沙漏簧有限元模型

2.2 刚度及应力应变分析

1) 沙漏簧刚度曲线

利用仿真软件非线性方法进行求解沙漏簧的大变形问题,可以从仿真结果中得到应力、应变分布状态,在此基础上研究其在垂向和横向的刚度性能。各个方向上的刚度仿真计算结果如表1和表2所示。

表1 沙漏簧的垂向特性

项点	刚度/(N·mm ⁻¹)	
垂向载荷/kN	设计要求	计算结果
13.5~23.5	450(1±10%)	471
24.5~34.5	750(1±10%)	768

表2 沙漏簧的横向特性

项点	刚度/(N·mm ⁻¹)	
横向位移/mm	设计要求	计算结果
50	80(参考)	83

通过有限元模拟获得沙漏簧的垂向刚度曲线如图5所示,横向刚度曲线如图6所示。

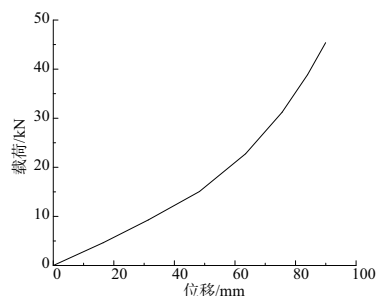


图5 静态垂向刚度计算曲线

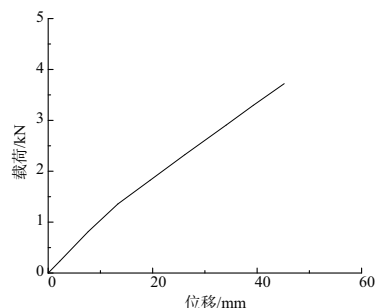


图6 静态横向刚度计算曲线

从图5沙漏簧垂向刚度计算曲线可以看出其趋势和设计一致;表1和表2中列出了不同项点下沙漏簧垂向、横向刚度要求和计算结果,可以看出沙漏簧静态垂向刚度计算满足设计要求。

2)最大应力、应变

在实际使用中,应力超标是导致部件断裂的主要原因,故对模型进行有限元计算,获得模型的最大应力、应变结果如图7、图8以及表3所示。

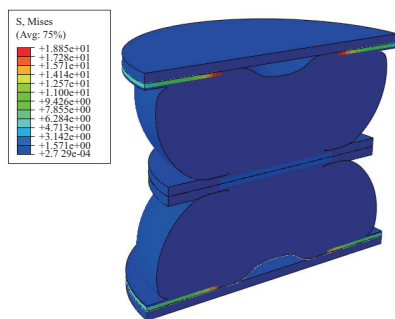
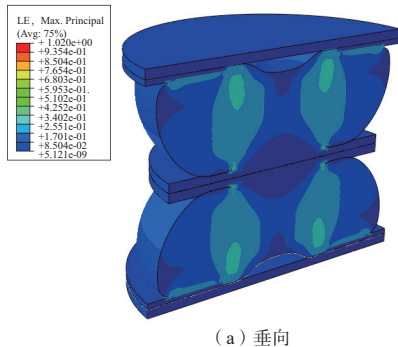
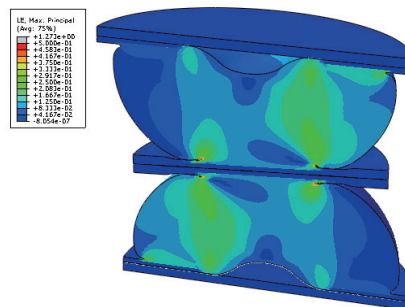


图7 金属最大应力云图



(a) 垂向



(b) 横向

图8 橡胶最大应变云图

表3 垂向加载 35.69 kN 时最大应力、应变

材料名称	最大应力/MPa	应变/ $\mu\epsilon$	屈服强度/MPa	安全系数
金属橡胶	188.5	1.02	345	1.83

图7和图8是沙漏簧在垂向及横向载荷作用下,沙漏簧金属应力云图和橡胶部分应变云图。可以看出金属结构最大应力出现在上下盖板和橡胶连接处,橡胶应变出现在中部部位。表3中列出了沙漏簧金属件和橡胶件的最大应力和应变以及其对应的许用要求。从表3可以看出,沙漏簧的垂向静载分析满足工程要求。

3 性能试验

沙漏簧在使用中主要承载车体垂向载荷,故根据此特点,试验测试了弹簧垂向刚度。工况根据载荷施加的快慢不同分为:静态刚度、动态刚度和冲击刚度试验。沙漏簧是一个重要部件,需要其有足够长的使用周期,故针对其寿命的相关试验,还包括耐疲劳性能、蠕变和低温特性等。

3.1 静态垂向刚度试验

在试验台上,以非常低的速度在沙漏簧上施加载荷时,所施加的载荷与仪器测得的弹簧变形量之间的关系通常称之为静刚度,以 K_s 表示。试验中选取2套沙漏簧按照如图9所示进行加载,在加载阶段测试沙漏簧在13.5~23.5 kN和24.5~34.5 kN载荷区间的刚度。

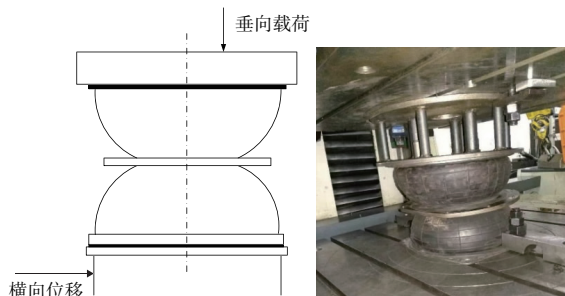


图9 静态垂向刚度试验示意图

试验结果如表4和图10所示,从表4中可以看出2个沙漏簧在13.5~23.5 kN间的刚度分别为458.51 N/mm和454.45 N/mm,满足设计要求的450(1±10%) N/mm,在24.5~34.5 kN间的刚度分别为765.88 N/mm和769.05

N/mm,满足设计要求的 $750(1\pm 10\%)$ N/mm。图 10 给出了沙漏簧静态垂向刚度试验曲线。

表 4 静态垂向特性

垂向载荷 区间/kN	刚度要求/ (N/mm)	试验结果		判定
		P1/(N/mm)	P2/(N/mm)	
13.5~23.5	450(1±10%)	458.51	454.45	合格
24.5~34.5	750(1±10%)	765.88	769.05	合格

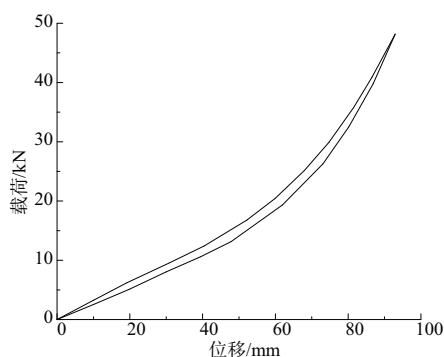


图 10 静态垂向刚度试验曲线

3.2 静态横向刚度试验

当沙漏簧垂向分别预载 AW0 (18.5 kN) 和 AW3 (29.5 kN) 条件下,为了贴近实际使用状态,将车辆极限载荷以横向位移方式施加到模型上,所测得的载荷与变形的关系称之为静态横向刚度,以 K_h 表示。

试验中选取 2 套沙漏簧按照如图 11 所示进行加载,计算 ± 50 mm 区间的刚度。

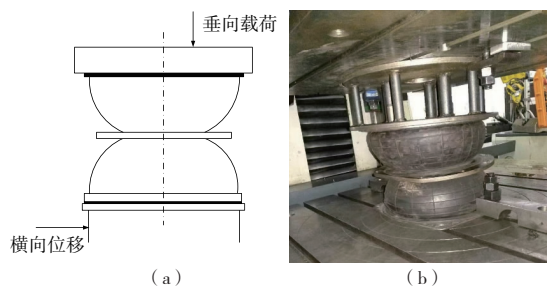


图 11 静态横向刚度试验示意图

试验结果如表 5 和图 12 所示,从表 5 中可以看出两个沙漏簧在 18.5 kN 下的横向刚度分别为 85.32 N/mm 和 80.25 N/mm,在 29.5 kN 下的横向刚度分别为 103.25 N/mm 和 96.54 N/mm,刚度整体较小,横向自由度高。图 12 给出了沙漏簧静态横向刚度试验曲线。

表 5 静态横向特性

垂向载荷/kN	刚度要求	试验结果		判定
		P1/(N/mm)	P2/(N/mm)	
18.5	参考	85.32	80.25	参考
29.5	参考	103.25	96.54	参考

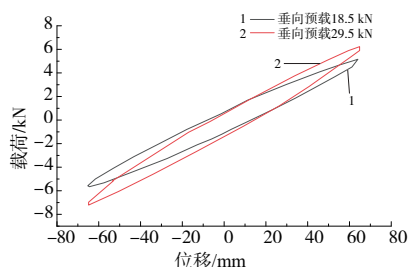


图 12 静态横向刚度试验曲线

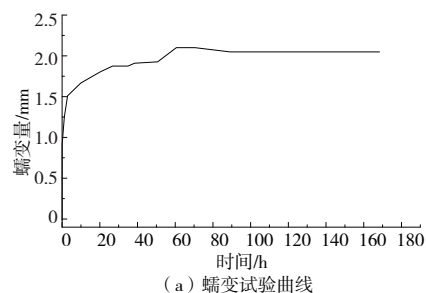
3.3 蠕变试验

橡胶件在长时间的使用中会出现蠕变现象,一方面是由于物理起因。橡胶是赫弹性体,外加应力和应变的影响不是瞬时的,会随时间而发展;另一方面由于化学起因:橡胶受氧化作用,使橡胶分子链断裂或进一步交联,这就造成在恒定负荷下橡胶的应变会随时间而逐渐增大。因此需要对沙漏簧进行压缩蠕变试验,即在规定负荷下测定沙漏簧压缩变形随时间而增加的试验。选取 1 套沙漏簧,如图 13 所示在垂向加载 29.5 kN 进行蠕变测试。

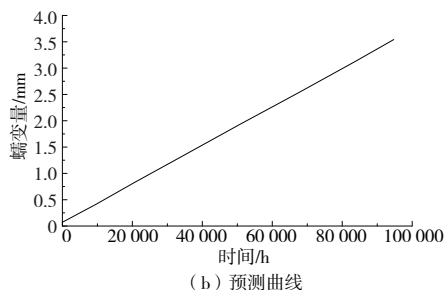


图 13 蠕变试验示意图

图 14 给出了沙漏簧在 168 h 的静态蠕变性能试验曲线和 8 年的预测曲线。从图 14(a) 可以看出,沙漏簧在 168 h 的蠕变量最大为 $2.07 \text{ mm} \leq 7 \text{ mm}$ (规定值),满足设计要求。图 14(b) 给出了沙漏簧 8 年使用寿命预测曲线,最大蠕变量为 $16 \text{ mm} \leq 18 \text{ mm}$ (规定值),满足设计要求。



(a) 蠕变试验曲线



(b) 预测曲线

图 14 静态蠕变性能试验曲线

3.4 疲劳试验

由于低地板车运量大,线路小曲线多,故二系簧产生的位移变形较大。试验中需要对沙漏簧进行垂向以及横向疲劳验证,以确保沙漏簧的使用寿命达到8年。在试验过程中,根据车辆的实际载荷谱设计了沙漏簧垂向疲劳方案;选取1套一系沙漏簧对其在垂向载荷26.5 kN、

横向振幅 ± 65 mm下进行100万次以及垂向载荷35.7 kN、横向振幅 ± 65 mm下进行5万次疲劳试验,振动频率1 Hz。

试验后检查样品是否完好,刚度变化应不大于20%,压缩高度变化应不大于18 mm。表6给出了沙漏簧疲劳试验前后垂向静态刚度和压缩高度变化结果,图15给出了沙漏簧疲劳试验后的照片。

表6 疲劳试验前后结果对比

垂向 载荷/kN	疲劳试验前		疲劳试验后		变化率/%	压缩高度 变化/mm	判定
	刚度/(N/mm)	压缩高/mm	刚度/(N/mm)	压缩高/mm			
13.5~23.5	454.45	245.7	486.58	233.1	6.12	12.6	疲劳试验前后产品的垂向刚度变化不大于20%,压缩高度变化不大于18 mm。
24.5~34.5	769.05		898.19		16.79		



图15 疲劳试验后样品照片

从表6中可以看出,疲劳试验前后沙漏簧在13.5~23.5 kN载荷作用下,垂向静态刚度变化率为6.12%,在24.5~34.5 kN载荷作用下,垂向静态刚度变化率为16.79%,压缩高度变化了12.6 mm,均满足设计要求,此样品测试合格。

4 仿真分析与性能试验结果对比

有限元仿真是为了在设计初期对产品一个初步的评估,试验是产品生产后的一个验证工作,两者在产品开发过程中都起到关键的作用。有限元仿真的准确性决定了产品后期开发的成本,试验验证是最终决定了产品的有效性,同时验证了有限元仿真的准确性。

表7给出了仿真分析与性能试验结果的对比,从中可以看出沙漏簧刚度在计算结果与试验结果变化最大误差:(13.5~23.5) kN 挠度最大误差3.5%,(24.5~34.5) kN 挠度最大误差0.3%。排除掉一些合理的误差,一定程度上说明计算模型的有效性以及计算结果的合理性和准确性。

表7 仿真分析与性能试验结果对比

项点 (垂向 载荷/kN)	刚度/(N/mm)			
	设计要求	计算结果	试验结果	误差/%
13.5~23.5	450(1 $\pm$ 10%)	471	458.51	2.7
			454.45	3.5
24.5~34.5	750(1 $\pm$ 10%)	768	765.88	0.3
			769.05	0.1

5 结语

沙漏簧主要是用于城市轨道交通中低地板车辆转向架中的二系悬挂系统。其技术优势主要表现在:拥有非线性的垂向刚度,当载荷较小时垂向刚度也很小,可提高乘坐舒适度以及安全性;在承受极限载荷时垂向刚度将会迅速增大,限制车体下沉量;其安装简单、质量轻,可以减少电机能耗,更环保,在此基础上可以提高载客量,提高运行速度。

本文从车辆设计参数出发,通过沙漏簧选型,参数设计,有限元仿真,试验验证及对比,最终得到了有益的效果。

1) 沙漏簧刚度及应力、应变在理论仿真计算上满足设计要求,后经刚度试验验证了仿真模型建立和计算结果的合理性和有效性。

2) 对沙漏簧刚度、蠕变及疲劳特性进行试验验证,均满足设计要求。目前该型沙漏簧已经装车正式使用。

3) 上述沙漏簧进行国产化的成功研制,为后续低地板车辆橡胶零部件的研制在理论和试验上起到了参考作用。

参考文献:

- [1] 赵明花. 低地板车辆的研制[J]. 都市轨道交通,2010,23(5):13-16.
- [2] 王新国,张松江. 低地板轻轨车辆的现状及发展[J]. 电力机车与城轨车辆,2003,26(4):47-49.
- [3] 赵刚强. 低地板轻轨车用沙漏簧的模拟研究与试验分析[J]. 中国橡胶,2021,37(8):45-48.
- [4] 冯万盛,孙海燕,柳禄泱. 城市轻轨车用二系沙漏型橡胶弹簧研究[J]. 铁道机车车辆,2012,32(2):64-67,108.
- [5] 刘兴起,黄友剑. 一种等频减振设计方法及其在低地板车橡胶弹簧中的应用[J]. 铁道机车车辆,2016,36(4):61-64.
- [6] 周炜,黄友剑,冯万盛. 轨道车辆用沙漏簧垂向刚度特性和失稳的探讨[J]. 铁道机车车辆,2010,30(6):54-56.
- [7] 陈清化,丁小平. 变刚度橡胶弹簧结构设计研究[J]. 内燃机与配件,2021(14):11-12.
- [8] 龚积球. 橡胶件的工程设计及应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,2003.

收稿日期:2022-03-08