

特约来稿

低温和频率对橡胶弹性元件刚度性能的影响

潘 锋¹, 彭立群^{2,3*}, 林达文^{2,3}, 王叶青^{2,3}

[1. 中国合格评定国家认可中心 认可四处 北京 100062; 2. 株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南 株洲 412007;
3. 国家轨道交通高分子材料及制品质量监督检验中心(湖南), 湖南 株洲 412007]

摘要:介绍橡胶弹性元件静刚度和动刚度的测试原理,设计一种新型低温刚度试验工装以对橡胶弹性元件进行静态和模态试验,研究温度对橡胶弹性元件静刚度和动刚度的影响,以及频率对橡胶弹性元件动刚度的影响。结果表明:本试验工装结构合理,满足试验要求,随着温度的降低,橡胶弹性元件静刚度和动刚度增大;随着频率的增大,橡胶弹性元件的动刚度在低频段增大,在一定频率后变小,最后趋于稳定;温度低于-40℃时橡胶弹性元件的动刚度-频率曲线的变化拐点前移。

关键词:橡胶弹性元件;低温;频率;静刚度;动刚度

中图分类号:TQ336.4⁺2

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2020)05-0323-07

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2020.05.0323



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

橡胶弹性元件作为高铁转向架重要的减振部件,其刚度不仅是影响车辆动力学性能的重要参数,而且是评价橡胶弹性元件减振效果的重要指标。随着“一带一路”战略实施,我国高铁机车大量出口,受国外高寒环境的影响,研究低温和频率对橡胶弹性元件刚度性能的影响不仅有利于提升产品质量,同时也有利于支撑贸易便利化的轨道交通关键设备认证。

对橡胶弹性元件进行刚度试验时发现,在低频段其动刚度随频率变化明显,在达到一定频率时由于驻波的质量效应使其动刚度偏离了理想的无质量弹簧刚度,从而无法获取频率与动刚度的关系,只能采取扫频试验测量获得^[1-9]。同时低温对橡胶弹性元件静刚度的影响也很大,且不同结构橡胶弹性元件的刚度变化也不一样。对于应用于高寒地区的橡胶弹性元件,其在夜间检修时处于低温静态承载,在日间运行时处于低温动态承载。安装在不同位置的橡胶弹性元件承受的振动频率也不一样。而目前的研究大都集中在单一结

构橡胶弹性元件静刚度或常温条件下动刚度试验,有关系统的、多结构橡胶弹性元件的研究甚少。

本研究以国内某企业送检的6种橡胶弹性元件为研究对象,通过大量试验和数据总结出其与静刚度和动刚度及动刚度与频率的变化规律。

1 实验

1.1 测试原理

静刚度(k)是指在一定范围内,试样所受压缩或拉伸负荷(F)变化量与其位移(S)变化量的比值。在静刚度试验过程中试样的负荷可以等效传递,不存在测量误差,变形采集按测量原理可分为系统测量、空白试验、百分表测量和外接位移传感器测量4种,其中系统测量是指直接通过试验机自身的传感器采集数据,这种方式采集的数据除试样变形外,还包含了试验机的刚性变形和工装的弹性变形,适用于刚度小变形大的弹性元件静刚度试验;空白试验是在系统试验的基础上减去空白试验变形,以达到提高试验数据准确性的目的,这种方式虽然可以提高数据准确性,但由于不同结构的试验机在不同压缩负荷条件下的空白变形试验不一样,导致试验操作不便、效率低。百分表测量和外接位移传感测量是同一种测试原理,即在试样最接近变形的地方直接测量变形数据,除

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFF0215602)

作者简介:潘锋(1978—),男,山东菏泽人,中国合格评定国家认可中心教授级高级工程师,硕士,主要从事轨道交通领域实验室认可管理及科研工作。

*通信联系人(pengliqun8805@163.com)

去工装变形和接触间隙,这种方式操作方便、试验准确,但两者的区别是百分表测量只能进行单点测试,无法形成完整的负荷-变形滞回曲线,而外接位移传感测量可实现连续记录变形数据,并通过计算机形成完整的负荷-变形滞回曲线,这种测量方式是行业内最先进、最常用的测量方法。

动刚度是指试样动态负荷振幅峰值与位移峰值之比。其负荷控制方式分为中值加振幅值和峰谷值2种,加载方式分为纯压式、纯拉式、预压式和预拉式4种,其中纯压式适用于橡胶堆类压缩型产品,纯拉式适用于牵引杆类产品,预压式适用于锥形弹簧类产品,预拉式适用于牵引类橡胶关节产品。动刚度试验的三要素分别是频率、振幅和循环次数,其中频率分为单频和多频扫描,振幅可以是负荷也可是变形,循环次数规定为100,待试样负荷与变形稳定后取最后3个循环数据平均值为测试值。计算方法分为直接频率响应法和模态频率响应法2种,其中直接频率响应法适用于测试弹性元件在不同频率下的动态特性,模态频率响应法适用于弹性元件扫频共振测试,验证其是否避开共振区。

弹性元件动刚度的测量方法分直接法、间接法和驱动点法3种。驱动点法是目前最常用的弹性元件动刚度测试方法,其分为原点测试和跨点测试2种,两者最大的区别是负荷传感器的安装位置,分别如图1(a)和(b)所示。

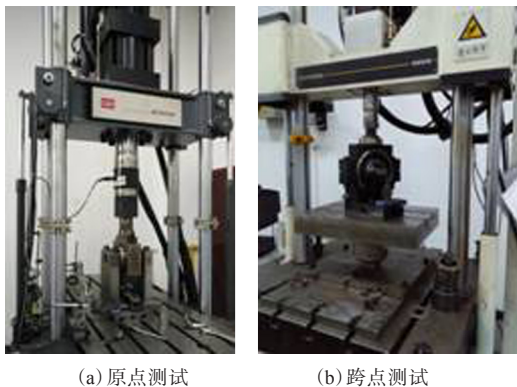


图1 原点测试与跨点测试负荷传感器的安装位置

原点测试是传感上置,这种方式安装方便、稳定性好,但是传感器本身质量产生的惯性力会影响测试精度。跨点测试是传感器下置,消除了测试误差,适用于刚度小、频率高的试验工况,车辆

减振弹性元件比较适用于原点测试方式^[6]。

1.2 试验设计

以橡胶节点为例,其刚度试验工装结构如图2所示,其由上接头、锁紧外套、芯轴、支撑块、底板和螺栓组成。其中橡胶节点通过芯轴和支撑块固定于试验平台,通过对外套施加拉压负荷进行刚度试验。

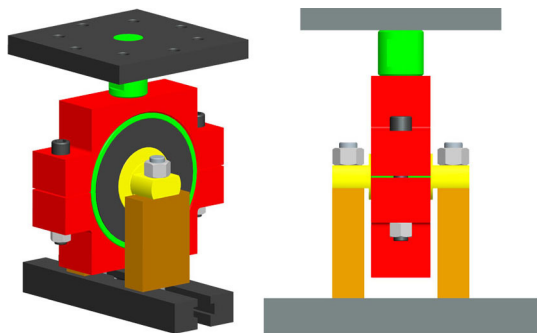


图2 试验工装结构

有限元分析主要是采用Abaqus软件对工装关键承载件芯轴和外套的强度、刚度(弹性变形)、模态固有频率进行分析计算。工装选用的材料是45号钢,密度为 $7.8 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$,弹性模量为210 GPa,泊松比为0.3,抗拉强度为600 MPa,屈服强度为355 MPa。计算得出芯轴最大应力为88.9 MPa,产生在两端倒角处,最大变形为0.002 mm,产生在芯轴中间位置,详见图3;外套最大应力为24.2 MPa,产生在内圆底部,最大变形为0.02 mm,产生在下端中间位置,详见图4。工装最大应力小于材料允许值,最大总变形为0.022 mm,远小于橡胶变形,计算结果满足静态试验要求。

根据IEC 61373—2016《铁路应用铁道车辆设备冲击和振动试验标准》要求,对工装承载件外套

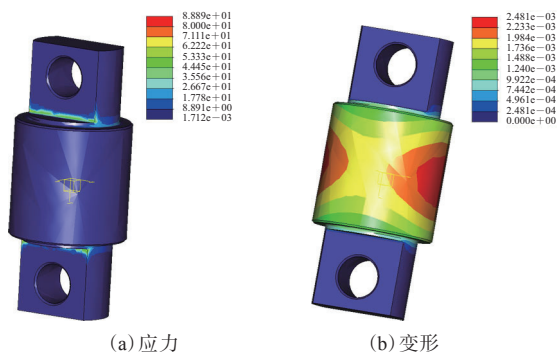


图3 芯轴应力/变形云图

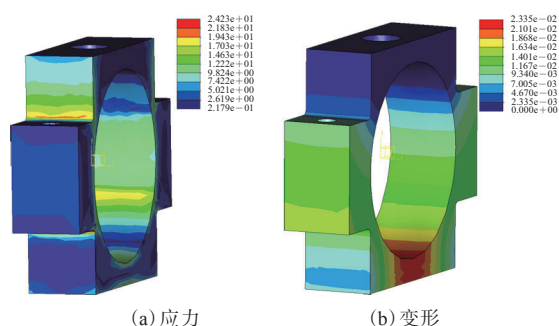


图4 外套应力/变形云图

进行模态分析,结果如图5所示,外套四阶自振频率分别为503,627,728和846 Hz,外套的最低固有频率远高于试验最高激振频率30 Hz,不会产生共振现象,满足动态试验要求。

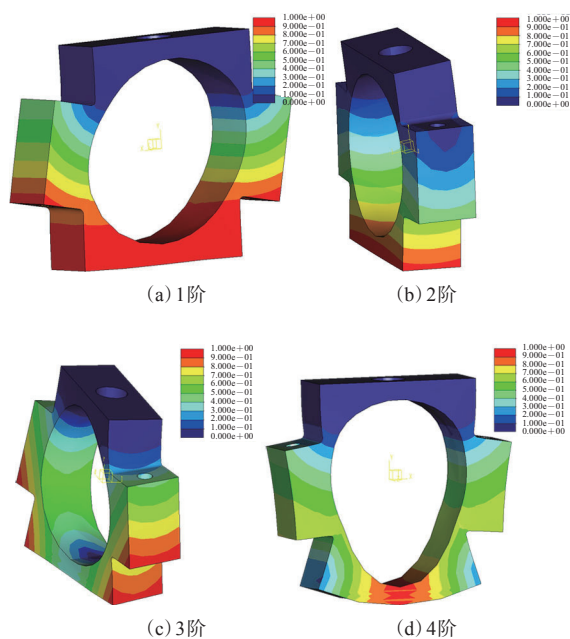


图5 外套四阶振型图

2 结果与讨论

2.1 橡胶节点

橡胶节点在不同温度下的静刚度特性曲线如图6所示,曲线的斜率表示静刚度,包络面积表示加卸载过程中消耗的能量。

从图6可以看出,随着温度的降低,橡胶节点的静刚度增大,同时滞回曲线包络面积减小,表示减振效果变差。橡胶节点23,0和-20℃下的静刚度分别为68.17,70.92和74.32 kN·mm⁻¹。

橡胶节点在不同温度下动刚度-频率曲线如

图7所示。

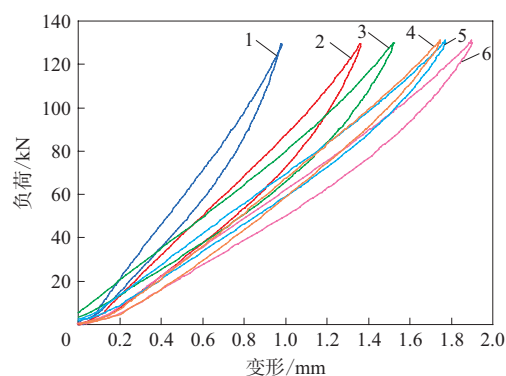
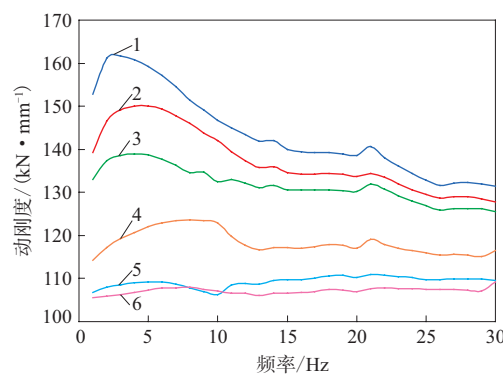


图6 橡胶节点在不同温度下的静刚度特性曲线



注同图6。

图7 橡胶节点在不同温度下的动刚度-频率曲线

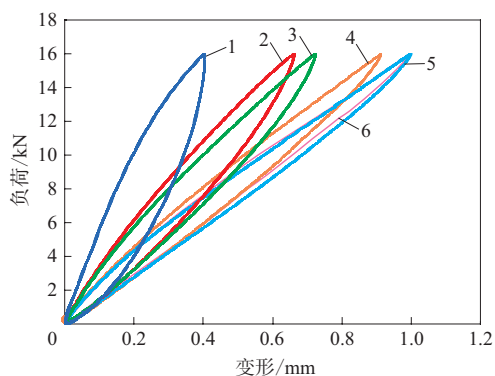
从图7可以看出,随着温度的降低,橡胶节点的动刚度增大,这与其静刚度变化规律一致。此外,在23~-40(不含)℃范围内,随着频率的增大,橡胶节点的动刚度在频率小于10 Hz时增大,在频率大于10 Hz时减小,然后趋于稳定;在-40和-60℃时动刚度变化频率点分别前移至5和3 Hz。

随着频率增大,橡胶节点的动刚度先增大后减小的原因主要是橡胶弹性元件的超弹性,其动刚度与激振频率之间表现出一种非线性关系,随着频率的增大,动刚度先增大后减小,在其固有频率处引发共振,此时振幅增大,动刚度减小。低温下导致橡胶节点动刚度变化频率点前移是因为其刚度增大,共振点发生变化。

2.2 弹性球铰

弹性球铰在不同温度下的静刚度特性曲线如图8所示。

从图8可以看出,随着温度的降低,弹性球铰

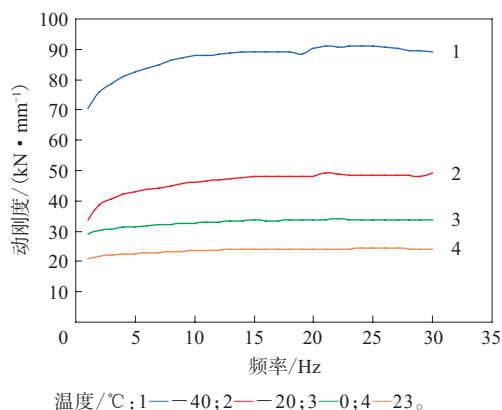


注同图6。

图8 弹性球铰在不同温度下的静刚度特性曲线

的静刚度增大, 滞回曲线包络面积减小。与橡胶节点相比, 弹性球铰静刚度滞回曲线的线性关系发生了变化, 其中橡胶节点在变形超过1/2时, 负荷与变形呈非线性关系, 而弹性球铰的负荷与变形基本呈线性关系。弹性球铰23, 0和-20 °C下的静刚度分别为2.91, 3.17和3.39 $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

弹性球铰在不同温度下的动刚度-频率曲线如图9所示。



温度/°C: 1—40; 2—20; 3—0; 4—23。

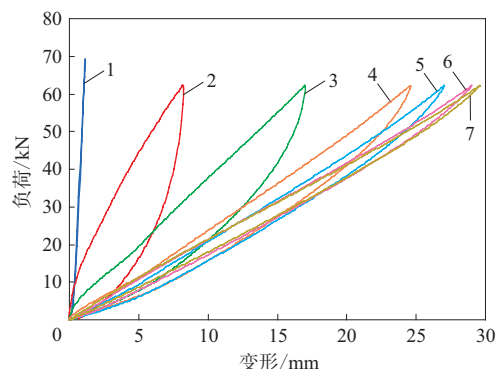
图9 弹性球铰在不同温度下的动刚度-频率曲线

从图9可以看出, 随着温度的降低, 弹性球铰的动刚度增大。此外, 在23~-20(不含) °C范围内, 随着频率的增大, 弹性球铰的动刚度在频率小于15 Hz时增大, 然后趋于稳定; 在-20和-40 °C时动刚度变化频率点分别前移至10和8 Hz。

2.3 弹性支承

弹性支承在不同温度下的静刚度曲线如图10所示。

从图10可以看出, 随着温度的降低, 弹性支承的静刚度增大, 滞回曲线包络面积减小, 同时滞

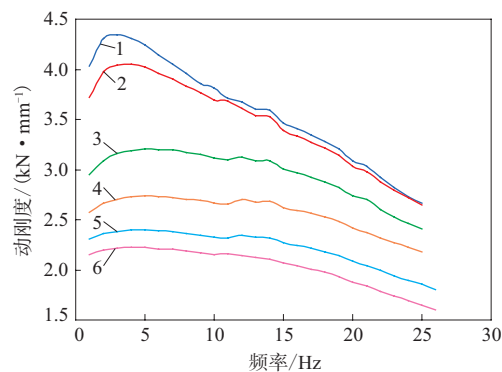


温度/°C: 1—65; 2—55; 3—50; 4—40; 5—25; 6—0; 7—23。

图10 弹性支承在不同温度下的静刚度曲线

回曲线形状发生了较大变化。在-40 °C时弹性支承静刚度为2.01 $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$, 较常温静刚度变化率为30%, 这表明该弹性支承具有较好的耐低温性能。在-65 °C时橡胶已硬化, 弹性支承的滞回曲线的加载与卸载曲线基本重合, 滞回曲线包络面积几乎为零, 弹性支承已失去减振性能。弹性支承23, 0和-25 °C下的静刚度分别为1.51, 1.62和1.82 $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

弹性支承在不同温度下的动刚度-频率曲线如图11所示。



注同图6。

图11 弹性支承在不同温度下的动刚度-频率曲线

从图11可以看出: 弹性支承的动刚度随着温度和频率的变化规律与橡胶节点和弹性球铰基本一致; 在高于-40 °C时, 在低频段弹性支承的动刚度变化更明显。

2.4 橡胶弹簧

橡胶弹簧在不同温度下的静刚度特性曲线如图12所示。

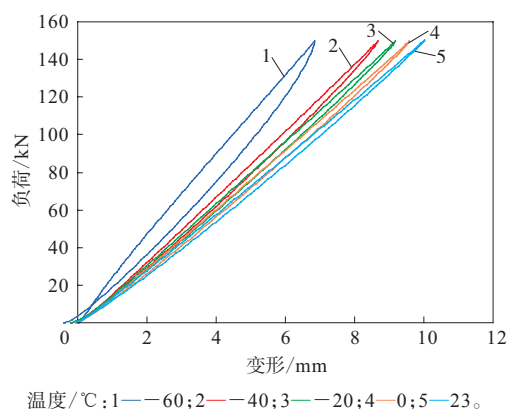
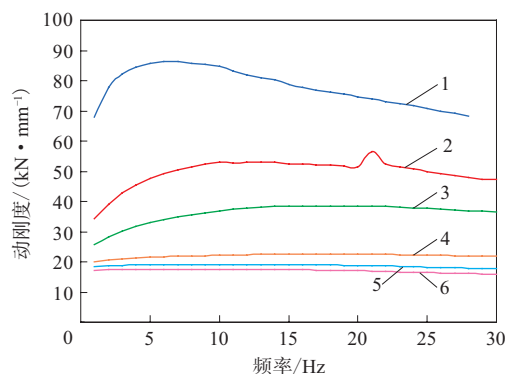


图12 橡胶弹簧在不同温度下的静刚度特性曲线

从图12可以看出,随着温度的降低,橡胶弹簧的静刚度增大,滞回曲线包络面积减小。橡胶弹簧是一种多夹层且橡胶层较厚的弹性元件,虽然刚度随温度的降低而增大,但相对前3种产品,橡胶弹簧具有更好的耐低温性能, -60°C 的静刚度较常温静刚度变化率仅为35%,这是因为橡胶弹簧体积大且夹层多,在低温过程中难以实现全面冷冻,同时加载过程中压缩率变大,本身产生一定热量,这种自身加热的功能使其静刚度有所回升,因此橡胶弹簧的结构设计也是一种降低低温刚度变化率的手段。橡胶弹簧23,0和 -20°C 下的静刚度分别为15.01,15.3和15.7 $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

橡胶弹簧在不同温度下的动刚度-频率曲线如图13所示。

从图13可以看出,橡胶弹簧的动刚度随着温度和频率的变化规律与前3种产品有所不同,在高于 -40°C 时,橡胶弹簧的动刚度随着频率的增大变化不明显,在低于 -40°C (含)时,动刚度随频率



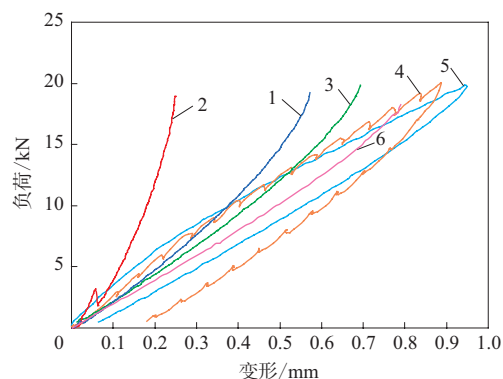
注同图6。

图13 橡胶弹簧在不同温度下的动刚度-频率曲线

的增大变化较明显,表现为随着频率的增大,动刚度在频率小于5 Hz时增大,在频率大于5 Hz时减小,然后趋于稳定。这是因为对于橡胶层厚的弹性元件,橡胶变形受动静负荷的影响相对较小。

2.5 连杆球铰

连杆球铰在不同温度下的静刚度特性曲线如图14所示。



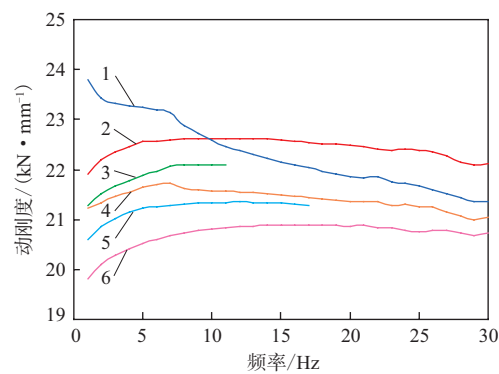
注同图6。

图14 连杆球铰在不同温度下的静刚度特性曲线

从图14可以看出,随着温度的降低,连杆球铰的静刚度增大。相比前面论述的关节类橡胶弹性元件,连杆球铰在低于 -20°C 后且变形超过2/3时,负荷随变形的非线性增大更为明显。连杆球铰23,0和 -20°C 下的静刚度分别为18.12,21.22和22.16 $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

连杆球铰在不同温度下的动刚度-频率曲线如图15所示。

从图15可以看出,在23 $\sim$ -40 (不含) $^{\circ}\text{C}$ 范围内,随着频率的增大,连杆球铰的动刚度在频率小



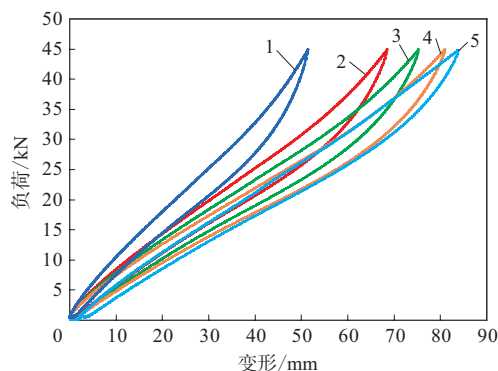
注同图6。

图15 连杆球铰在不同温度下的动刚度-频率曲线

于12 Hz时增大,在频率大于12 Hz时减小,然后趋于稳定;在-40和-60 °C时动刚度变化频率点分别前移至6和5 Hz。

2.6 圆锥弹簧

圆锥弹簧在不同温度下的静刚度特性曲线如图16所示。



温度/°C: 1—50; 2—-40; 3—-20; 4—0; 5—23。

图16 圆锥弹簧在不同温度下的静刚度特性曲线

圆锥弹簧是一种典型的圆锥形大位移压剪类结构弹性元件,静刚度特性曲线是典型的大变形非线性变形曲线。从图16可以看出,圆锥弹簧在不同温度下均表现出一种变刚度特性,负荷随变形呈现增大、减小、再增大的特性。这表明圆锥弹簧在不同承载区间能够表明出不同的静刚度,满足运营工况的要求。同时圆锥弹簧滞回曲线包络面积随温度降低变化不明显,这表明圆锥弹簧虽然刚度变大,但依然具有较好的减振性能。圆锥弹簧23,0和-20 °C下的静刚度分别为0.51,0.55和0.60 $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

圆锥弹簧在不同温度下的动刚度-频率曲线如图17所示。

从图17可以看出,随着温度的降低,圆锥弹簧的动刚度增大,这与静刚度变化规律一致。在23~0 °C范围内,圆锥弹簧的动刚度随着频率的增大总体呈减小趋势;在-20 °C时频率对圆锥弹簧动刚度的影响不明显;在-40 °C时,圆锥弹簧的动刚度在频率小于10 Hz时增大,在频率大于10 Hz时减小。这表明圆锥弹簧的动刚度同时受温度和频率两个参数的影响,在进行产品结构和配方设计时需同时考虑。

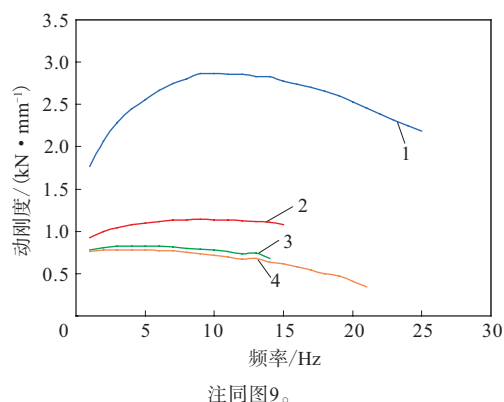


图17 圆锥弹簧在不同温度下的动刚度-频率曲线

3 结论

(1) 温度对橡胶弹性元件静刚度的影响:随着温度的降低,橡胶弹性元件的静刚度增大,静刚度变化率与温度(低温)成正比,同时滞回曲线包络面积减小,加载同等变形消耗的能量减小,减振效果变差。

(2) 温度对橡胶弹性元件动刚度的影响:随着温度的降低,橡胶弹性元件的动刚度增大,且不同结构的橡胶弹性元件动刚度受温度的影响不同。

(3) 频率对橡胶弹性元件动刚度的影响:橡胶弹性元件的动刚度随着频率的增大呈非线性增大趋势,通常在低频段,动刚度随频率的增大而增大,在达到一定频率后,动刚度减小,然后趋于稳定。

参考文献:

- [1] 辛强,陈侠,王志怀. 动力总成悬挂静、动刚度的测试研究[J]. 汽车零部件,2016,10(5):79-81.
- [2] 冯万盛,程畅,程海涛,等. 高速车变压器用橡胶减振器研究[J]. 机车电传动,2014,54(1):44-47.
- [3] 李超,李志远. 弹性元件低频动刚度测试方法研究[J]. 农业装备与车辆工程,2016,54(7):42-44.
- [4] 余威,戎芳明,王晓兰. 动刚度分析在转向系统动态特性研究中的应用[J]. 机械工程师,2017,48(1):136-138.
- [5] 王进,张保生,王三孟,等. 高阻尼橡胶材料研究进展及其在隔振橡胶支座中的应用[J]. 特种橡胶制品,2017,38(3):69-72.
- [6] 彭立群,林达文,王进,等. 橡胶弹性元件跨点测试动态性能试验设计与研究[J]. 中国橡胶,2017,33(2):44-47.
- [7] 彭立群,林达文. 低温对橡胶弹性元件传递率和固有频率的影响[J]. 铁道机车车辆,2018,38(6):55-58.
- [8] 彭立群,林达文. 橡胶弹性元件阻尼与损耗角试验设计与研究[J].

特种橡胶制品, 2019, 40(6): 51-55.

能的影响[J]. 橡胶工业, 2018, 65(1): 51-53.

[9] 刘权, 谭莲影, 陈晓艳. 硅烷偶联剂KH550对炭黑填充天然橡胶性

收稿日期: 2019-11-16

Influence of Low Temperature and Frequency on Stiffness of Rubber Elastic Components

PAN Feng¹, PENG Liqun^{2,3}, LIN Dawen^{2,3}, WANG Yeqing^{2,3}

[1. China National Accreditation Center for Conformity Assessment, Beijing 100062, China; 2. Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd, Zhuzhou 412007, China; 3. National Rail Transport Polymer Materials and Product Quality Supervision and Inspection Center (Hunan), Zhuzhou 412007, China]

Abstract: The test principle of the static and dynamic stiffness of rubber elastic components was introduced, and a new type of low temperature stiffness test fixture was designed to carry out static and modal tests on rubber elastic components. The effect of temperature on the static and dynamic stiffness of rubber elastic components was investigated, and the effect of frequency on the dynamic stiffness was also studied. The results showed that the structure of the test fixture met the test requirements. When the temperature decreased, the static and dynamic stiffness of rubber elastic components increased. When the frequency increased, the dynamic stiffness of rubber elastic components increased in the low frequency band, and beyond certain frequency the dynamic stiffness decreased and finally tended to be stable. The turning point of the dynamic stiffness-frequency curve moved toward the low frequency direction when the temperature decreased beyond $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: rubber elastic components; low temperature; frequency; static stiffness; dynamic stiffness

《橡胶工业》蝉联入选中国科技核心期刊 中国科学技术信息研究所在北京国际会议中心召开的2019年中国科技论文统计结果发布会上发布了《2019年版中国科技期刊引证报告(核心版)自然科学卷》,该报告收录了2 049种中国科技核心期刊(含中文期刊1 933种、英文期刊116种)。

经过多项学术指标综合评定及同行专家评议推荐,《橡胶工业》继续被收录为中国科技核心期刊,证书见图1,且学术影响力明显提高。

中国科技核心期刊是中国科学技术信息研究所经过严格的定量和定性分析选取出的各个学科的重要科技期刊,每年发布1次,这些期刊的论文构成了中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)。该数据库的统计结果编入国家统计局和国家科技部编制的《中国科技统计年鉴》,统计结果被科技管理部门和学术界广泛应用。

《2019年版中国科技期刊引证报告(核心版)



图1 中国科技核心期刊收录证书

自然科学卷》显示,在高聚物工程学科的12本中国科技核心期刊中,2019年《橡胶工业》核心影响因子(1.047)排名上升到第1名(2018年版为第7名),综合评价总分排名上升到第5名(2018年版为第12名)。

(本刊编辑部)