DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.204

宽温域高阻尼橡胶在车轮降噪领域的应用研究

查国涛，胡金昌，穆洪帅，王心龙
（株洲时代新材料科技股份有限公司，湖南 株洲 412007）

摘　要：针对车轮降噪阻尼器在宽温域应用环境中的降噪需求，文章以甲基硅橡胶与苯基硅橡胶为基体材料，结合添加苯基硅油阻尼添加剂等改性方法，成功研制出一种宽温域、高阻尼、低模量的橡胶材料。动态力学热分析（DMTA）试验结果显示，在－30～60 ℃宽温域内，改性后材料的弹性模量和损耗因子变化范围均控制在目标值的±20%以内。文章以提升车轮等效模态阻尼比为设计优化目标，进一步研制了车轮降噪阻尼器。试验结果表明，该降噪阻尼器在宽温域下动态性能稳定，对车轮的减振降噪效果显著，可满足复杂工况的应用需求。

关键词：宽温域；阻尼橡胶；车轮降噪；阻尼器；模态；仿真

中图分类号：U270.1^{+}6；TB533^{+}.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2026)04-0170-07

0　引言

轨道车辆运行时产生的噪声成因复杂多样，主要包括轮轨噪声、牵引设备噪声及空气动力噪声等。对于速度 50～250 km/h 的轨道交通系统，轮轨噪声是最主要的噪声源：在直线段或大曲线段以滚动噪声为主，在小曲线段除了滚动噪声，还可能出现啸叫噪声。安装车轮阻尼器是降低轮轨滚动噪声与啸叫噪声的有效手段之一[1-3]，深入研究其降噪机理及应用技术，对轨道交通环境噪声与车内噪声的控制具有重要意义。

车轮阻尼器由橡胶阻尼材料和金属结构件组成，其动态特性是影响车轮减振降噪效果的关键因素，主要表征参数为固有频率和阻尼比。一方面，利用橡胶阻尼材料的超弹特性，使金属结构件产生特定固有频率的谐振，进而转移并吸收车轮振动能量，这要求橡胶材料具有最佳量值的橡胶弹性模量；另一方面，利用橡胶阻尼材料的黏弹性阻尼效应，将机械能或声能转化为热能并耗散，进而降低车轮振动与声辐射，这要求橡胶材料具有较高的损耗因子。

车轮阻尼器安装于轨道车辆轮对上，需适应−40～45 ℃甚至更宽的温度环境，因此其动态性能需具有良好的高低温稳定性。常规橡胶阻尼材料从极限低温升至极限高温时，依次经历玻璃态区、过渡区、橡胶态区和流动区，弹性模量和损耗因子会随温度变化而出现较大波动，导致车轮阻尼器的高低温减振降噪性能不稳定。此外，常规橡胶材料的阻尼损耗因子较低（约0.1），无法满足车轮阻尼器的设计要求。因此，如何使橡胶材料在宽温域下保持稳定的弹性模量与高损耗因子，进而使车轮阻尼器在宽温域下保持优异的减振降噪性能，已成为行业内亟待解决的技术难题与重要研究方向。

1　车轮阻尼器降噪机理

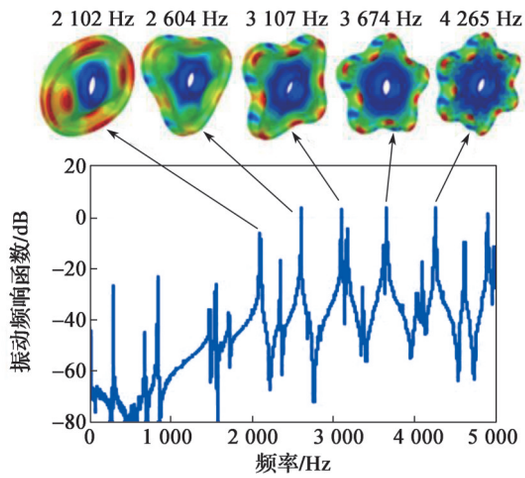
车轮在钢轨上滚动时，轮轨表面的粗糙度及凹凸不平引发强振动，车轮表面振动进而引起周期性空气扰动，形成辐射噪声。在轮轨系统中，1.6 kHz 以上频段的最主要噪声源为车轮。图 1 为某型车轮实测振动频响和辐射噪声频谱。从图 1 可以看出，车轮振动主频与

通信作者：查国涛，男，硕士，高级工程师，主要从事噪声与振动控制研究；E-mail: zhaguotao@csrzic.com

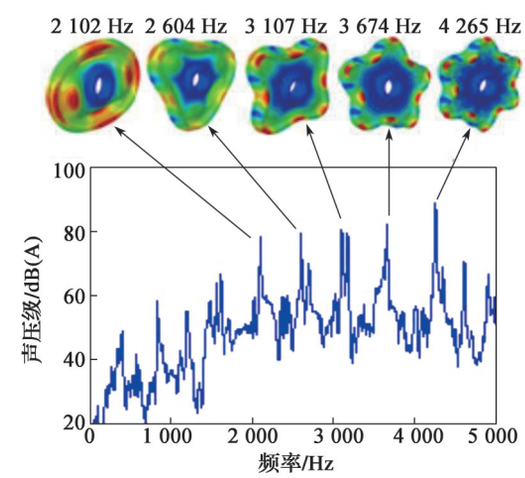
引用格式：查国涛, 胡金昌, 穆洪帅, 等. 宽温域高阻尼橡胶在车轮降噪领域的应用研究[J]. 机车电传动, 2026(4): 170-176.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.204.

Citation：ZHA Guotao, HU Jinchang, MU Hongshuai, et al. Research on the application of wide temperature range high damping rubber in wheel noise reduction[J]. Electric drive for locomotives,2026(4): 170-176.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.204.

辐射噪声主频均呈现若干窄带线谱特征，分别为2 102 Hz、2 604 Hz、3 107 Hz、3 674 Hz、4 265 Hz，与车轮径向模态频率一一对应，且主要能量分布在1 000 ~ 5 000 Hz频带内。



(a) 振动频响



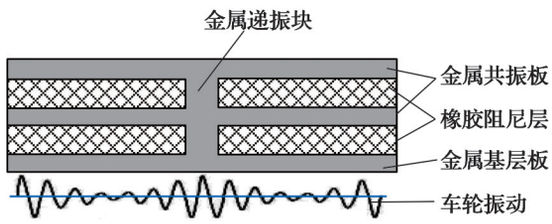
(b) 辐射噪声

图1　车轮模态、振动频响和辐射噪声

Fig. 1　Wheel modal characteristics, vibration frequency response, and radiated noise

控制车轮振动和辐射噪声的根本途径是抑制车轮模态共振，降低共振主频数量及峰值，因此可采用约束阻尼减振与动力吸振原理抑制共振。如图2(a)所示为降噪阻尼器的原理图，阻尼器由金属基层板、橡胶阻尼层（2 ~ 4层）、金属共振板（2 ~ 4层）和金属递振块组成。当车轮产生振动时，振动经由金属基层板和金属递振块快速传递至各层金属共振板，促使悬臂梁式金属共振板产生多阶谐振与弯曲变形，同时橡胶阻尼层发生剪切和拉压变形，将车轮振动能量转化为热能，从而抑制声辐射。基于该原理，设计出如图2(b)所示的车轮阻尼器，沿车轮周向均布8个阻尼器，通过紧固件沿车轮径向安装于轮辋内侧，用于降低车轮滚动噪声与啸叫噪声。

车轮-阻尼器振动系统本质上为质量-弹簧-阻尼器



(a) 结构原理



(b) 车轮阻尼器

图2　车轮阻尼器结构原理及模型

Fig. 2　Structural principle and modeling of wheel dampers

（M-K-C）系统，本文通过复刚度与等效模态阻尼理论[4]，获取系统各阶模态的等效模态阻尼比，表达式如式(1)。

$$\xi_{\mathrm{eq}_r}=\xi_r+\sum_{t=1}^{D}\frac{\{\boldsymbol{\phi}_{rt}\}^2\sum_{s=1}^{M}\{\gamma_s\}}{2\{m_r\}\omega_r^2} \tag{1}$$

式中：ξ_{eq_r}为第r阶模态系统的等效模态阻尼比；ξ_r为第r阶模态未安装阻尼器车轮系统的等效模态阻尼比；D为阻尼器数量；$\boldsymbol{\phi}_{rt}$为未安装阻尼器时提取的第r阶模态下车轮与第t个阻尼器接触节点的模态位移向量；$\sum_{s=1}^{M}\{\gamma_s\}$为第$r$阶模态下阻尼器对车轮的虚部支反力，可通过有限元仿真计算提取；$\{m_r\}$为未安装阻尼器时第r阶模态下的模态质量；ω_r为系统的第r阶固有频率。

依据上述原理，结合数值仿真手段建立车轮阻尼器有限元仿真模型，通过直接稳态仿真分析得到车轮各阶模态频率下的虚部动刚度（单位正弦位移下的虚部支反力$\sum_{s=1}^{M}\{\gamma_s\}$），再结合未安装阻尼器时的车轮模态参数，根据式(1)计算得到安装阻尼器后车轮各阶的等效模态阻尼比。结合优化算法，以车轮等效模态阻尼比最大化为优化目标，对车轮阻尼器的设计变量参数进行匹配优化[5]，最终确定最佳的各层厚度、橡胶材料损耗因子及弹性模量等参数，从而最大限度降低车轮各阶模态的振动响应与辐射噪声。

2　车轮阻尼器橡胶材料

2.1　橡胶阻尼材料的性能要求

根据上述车轮阻尼器降噪机理，若要实现降低车轮辐射噪声10 dB(A)以上的设计目标，需为橡胶阻尼材料匹配设计最佳的损耗因子和弹性模量参数，使车轮等效模态阻尼比提升近一个数量级。在材料阻尼设

计方面，采用高阻尼损耗因子的材料，有利于拓宽动力吸振频率带宽，为车轮各频率段提供较高的阻尼增量，从而提升减振降噪效果；在材料弹性模量设计方面，需结合车轮具体规格及其模态特性进行匹配，使阻尼器最佳工作频率区间覆盖车轮主要模态频率。国内轨道车辆的应用环境温度通常为−40~45 ℃，而车轮降噪阻尼器安装于轮辋内侧，受车轮高速滚动产热及自身振动阻尼耗能产热影响，其正常工作温度通常为−30~60 ℃。因此，本文试验研究重点分析车轮降噪阻尼器在−30~60 ℃下的高低温性能稳定性。通过匹配优化，确定橡胶阻尼材料在−30~60 ℃宽温域内的关键性能要求如表1所示，需满足弹性模量低、损耗因子高、高低温稳定性强等性能要求。

表1 橡胶阻尼材料的关键性能要求

Table 1 Key performance requirements of rubber damping materials

指标	23 ℃（常温）	−30~60 ℃（高低温）
弹性模量	1～3 MPa间达到最佳匹配值	变化率不大于±20%
损耗因子	0.3	变化率不大于±20%

2.2 宽温域高阻尼橡胶材料改性设计方法

硅橡胶是一种以—Si—O—为主链的弹性体，具有较低的玻璃化转变温度，经改性设计后可在－50～200 ℃宽温域内展现卓越的耐高低温性能[6-13]，因此成为车轮阻尼器橡胶阻尼材料的首选。但常规硅橡胶的阻尼损耗因子较小（约0.1），且弹性模量和损耗因子随温度变化波动较大，需通过材料改性提升阻尼性能并保持性能稳定，具体方法如下：

①基础胶料选择。选择乙烯基含量适中（摩尔分数为0.1%～0.3%）的甲基乙烯基硅橡胶作为基础胶料，通过调控硫化活性与交联密度构建合适的交联结构，使材料具备良好的加工性能和综合性能，满足多元应用场景需求；同时，引入苯基质量分数为10%～30%的苯基硅橡胶[11]，并优化其与甲基硅橡胶的共混比例（3∶7～5∶5）；通过在硅橡胶分子侧链引入体积较大的苯基刚性基团，增加链段刚性，使分子链链段弛豫损耗提升30%~50%，填料-基体界面摩擦因数提高40%~60%，从而增强基础材料的阻尼性能。

②增塑剂添加与模量调控。在体系中添加质量分数为10%～15%的低分子量聚二甲基硅氧烷（polydimethylsiloxane，PDMS）作为增塑剂，可在对阻尼性能影响较小的前提下，实现模量降低与精准调控。此外，通过高比例硅油增塑，既能降低交联网络密度，又可抑制因白炭黑过量导致的模量上升。

③白炭黑填充剂改性。选用比表面积不小于200 m²/g的气相法白炭黑作为补强填料，其表面富含高活性Si—OH基团，与硅橡胶形成凝胶网络，且白炭黑颗粒之间还会形成附聚体网络，这些网络结构在外力作用下会发生破坏，通过内摩擦消耗能量，显著提升材料阻尼性能。采用硅烷偶联剂对白炭黑进行表面改性，可使其在硅橡胶基体中均匀分散、避免团聚，从而调节材料阻尼和其他力学性能，并降低极性基团对温度的敏感性。

④阻尼增强剂（苯基硅油）添加。硅油属于聚硅氧烷，具有优异的耐高低温性能，且与硅橡胶相容性良好。苯基硅油分子链中的苯基刚性侧基可与硅橡胶发生交联反应，限制硅橡胶分子链运动，增大分子链间的内摩擦力；添加5%～15%的苯基硅油，可显著提升材料的阻尼性能；此外，还可添加硅树脂微球与热塑性聚氨酯（thermoplastic polyurethane，TPU）微粉，这二者协同作用，在拓宽有效阻尼的温域的同时提升了温度稳定性。

⑤硫化体系优化。采用过氧化物硫化体系，精确控制硫化剂用量，综合利用一段硫化和二段硫化的特性，优化硫化温度、时间等工艺参数；通过调节交联反应程度，精准控制交联密度，使材料在不同温度下兼具良好的弹性与稳定的阻尼性能，从而拓宽应用温度范围。

通过上述材料改性设计，硅橡胶分子链具有较大的键角和取向自由度，显著增强了位阻效应，提升了分子链间的相互作用力，最终实现材料阻尼性能的显著提升和模量的精准调控，并展现出卓越的耐高低温性能。

对于车轮降噪用黏弹性阻尼材料，需保证其在不同地域及不同温度环境下性能稳定，因此在配方设计时，需利用橡胶态的曲线平坦区，通过调整配方使该区域与工作温度范围相匹配。为对比橡胶材料性能，研究团队为车轮阻尼器设计了3种典型材料配方，如表2所示。

表2 典型材料配方

Table 2 Typical material formulations

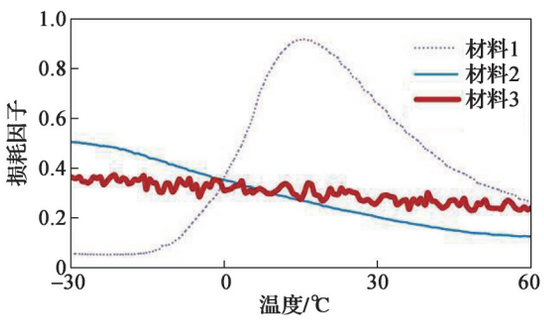
编号	基础胶料	配方改性措施
材料1	丁腈橡胶	高阻尼配方
材料2	硅橡胶	甲基硅橡胶与苯基硅橡胶共混，优化硫化体系
材料3	硅橡胶	在材料2基础上改性（添加PDMS增塑剂和苯基硅油，改性白炭黑填充剂，优化硫化体系）

2.3 橡胶阻尼材料动态力学热分析

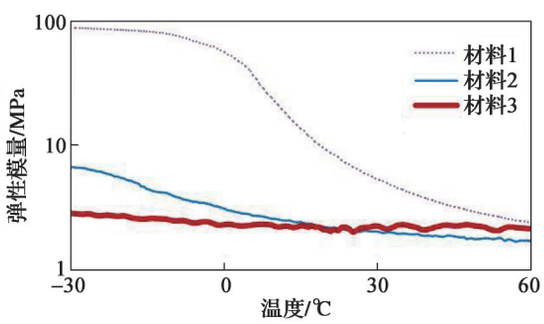
弹性模量与阻尼损耗因子是表征黏弹性阻尼材料性能的关键指标，其数值通过动态力学热分析（dynamic mechanical thermal analysis，DMTA）试验依据HB 7655—1999测得。3种典型材料配方的损耗因子试验结果如图3(a)和表3所示。

材料1以丁腈橡胶为主要成分，经改性后在玻璃化

转变温度附近，从玻璃态向高弹态转变，分子链内摩擦和耗能急剧增加，阻尼性能显著提升，损耗因子最大可达0.91；但在−30 ℃低温环境下，由于橡胶从高弹态转变为玻璃态，内摩擦和分子链段运动急剧减少，损耗因子仅为0.05，阻尼值随温度变化波动剧烈，无法满足车轮阻尼器的应用要求。



(a) 损耗因子



(b) 弹性模量

图3　DMTA曲线

Fig. 3　DMTA curves

表3　不同温度下的损耗因子

Table 3　Loss factors at varying temperatures

温度/℃	损耗因子			弹性模量/MPa		
	材料1	材料2	材料3	材料1	材料2	材料3
−30	0.05	0.50	0.36	87.4	6.7	2.8
23	0.82	0.23	0.32	7.5	2.1	2.2
60	0.26	0.12	0.24	2.3	1.7	2.1

材料2以甲基硅橡胶与苯基硅橡胶为主要成分，受分子链结构间协同效应、玻璃化转变温度较低、内摩擦作用增强等因素影响，其在−30 ℃时损耗因子较高（达0.50）；但随着温度升高，受分子链运动能力增强、分子间作用力减弱及材料从黏弹态向弹性态转变等因素影响，损耗因子下降趋势明显，在60 ℃时仅为0.12。

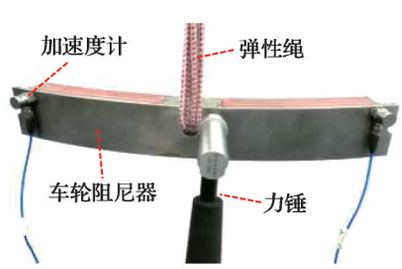
材料3在材料2的基础上得到进一步改性，通过添加PDMS增塑剂和苯基硅油，大幅增加苯基链节含量。苯基基团体积远大于甲基基团，可显著增强空间位阻效应，有效阻碍硅氧烷分子链在低温下的紧密排列与结晶倾向，普通甲基硅橡胶在−55~65 ℃会变硬变脆（呈玻璃态），低温模量较高；而添加苯基硅油（尤其含二苯基硅氧链节的苯基硅油）后，硅橡胶的玻璃化转变温度可显著降至−100 ℃甚至更低，使其在极寒环境下仍能保持优异的弹性和柔韧性，低温模量明显降低。此外，苯基的引入提升了硅橡胶分子的极性，根据相似相溶原理，可改善硅橡胶与改性白炭黑填充剂的相容性与分散性；同时，采用适配的过氧化物硫化体系，通过调整硫化剂用量、活性及硫化条件，精确控制最佳交联密度范围，并保留部分活性链段以提升高温下的阻尼因子峰值，使材料3的阻尼损耗因子与弹性模量随温度升高而下降的趋势更为平缓，在−30~60 ℃，阻尼损耗因子始终保持在(20±0.3)%范围内，满足车轮阻尼器宽温域、高阻尼及稳定模量的设计要求。

3种材料配方的弹性模量试验结果如图3(b)和表3所示。材料3在−30~60 ℃高低温环境下，弹性模量始终保持在（2.5±0.5）MPa，主要原因是PDMS增塑剂改性可降低分子间作用力并调节玻璃化转变温度，白炭黑填充剂改性可增强网络结构并改善热传导，苯基硅油则可提升分子链间相互作用的稳定性，三者协同作用大幅增强了弹性模量的温度稳定性，确保车轮阻尼器在宽温域内始终保持最佳谐振频率工作状态。材料1和材料2在低温下弹性模量会增大数倍甚至增大一个数量级，导致材料出现明显的硬化现象，均无法满足车轮阻尼器对橡胶弹性模量的设计要求。

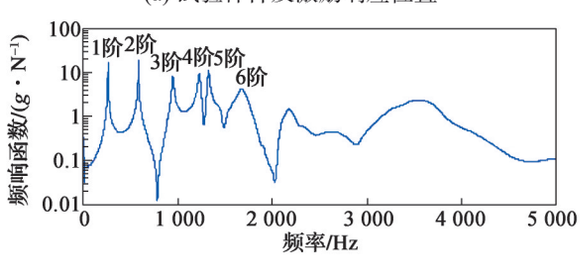
3　车轮阻尼器性能试验研究

3.1　车轮阻尼器高低温动态性能试验

研究团队采用材料3研制车轮阻尼器，并开展高低温动态性能试验，主要评价参数为前6阶固有频率及阻尼比。具体试验方法如图4(a)所示，试验样件经高低温调节后，采用弹性绳将单个车轮阻尼器样件水平悬挂，使其处于自由状态；在金属基层板两端的响应测点上，



(a) 试验样件及激励响应位置



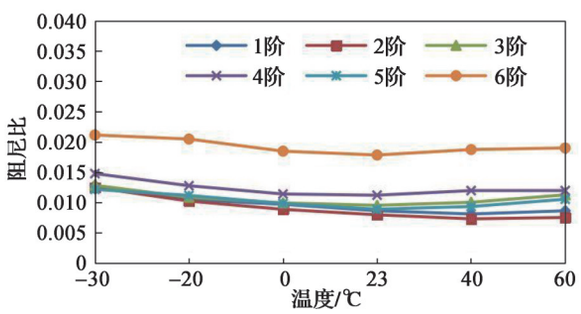
(b) 频响函数

图4　车轮阻尼器动态性能试验

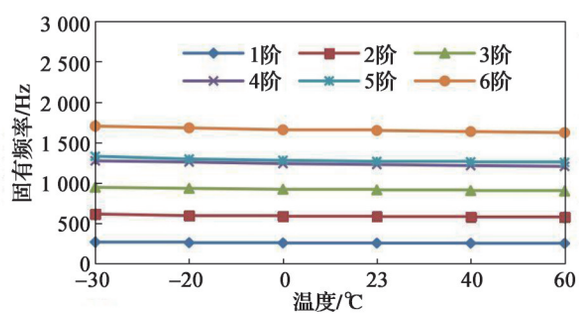
Fig. 4　Dynamic performance testing of wheel dampers

沿车轮阻尼器径向布置两个单向加速度计，采用力锤激励法进行模态测试，采集并分析激励力信号与加速度响应信号的频响函数，如图4(b)所示，要求样件从温度箱取出后2 min内完成测试。该试验采用的测试分析系统为LMS Test.Lab，力锤型号为B&K 8206，加速度计型号为PCB 352C03；激励点位于金属基层板中部靠近金属递振块处，激励方向沿车轮阻尼器径向，采样频率为12.8 kHz，频率分辨率为1 Hz，力信号采用力窗处理，加速度信号采用指数窗处理。

采用PloyMax法进行模态分析，提取阻尼器模态参数[14]。前6阶模态阻尼比试验结果如图5(a)所示，前5阶阻尼比相对较小，从第6阶开始大幅上升，主要原因是前5阶为阻尼器整体模态，受金属板整体刚度和结构阻尼影响较大，且各层金属板发生同向变形，整体阻尼较小；而从第6阶开始为阻尼器内部结构的局部模态，各层金属板之间产生反向运动，更易引发橡胶阻尼层的剪切与拉压变形，受橡胶阻尼材料弹性模量与损耗因子的影响显著增强，因而整体阻尼更大。此外，在−30~60 ℃，车轮阻尼器前6阶阻尼比保持稳定，最大变化量不超过±0.002 5。



(a) 前6阶阻尼比



(b) 前6阶固有频率

图5 阻尼器高低温动态性能变化

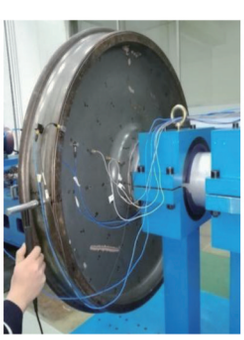
Fig. 5 Variation in dynamic performance of dampers at high and low temperatures

前6阶固有频率试验结果如图5(b)所示，在 − 30 ~ 60 ℃宽温域内，由于橡胶阻尼材料的弹性模量始终保持在（2.5±0.5）MPa，车轮阻尼器的固有频率变化率控制在5%以内，始终处于最佳谐振频率工作状态。

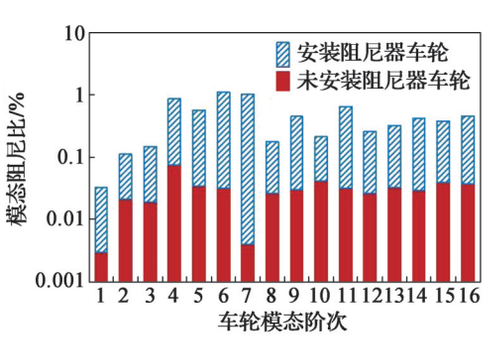
3.2 安装与未安装阻尼器的车轮振动频响试验对比

如图6(a)所示，将车轮降噪阻尼器安装于车轮后，在车轮踏面上沿径向、轴向、周向布置48个三向加速度测点，在辐板上沿轴向布置64个单向加速度测点。使用模态力锤沿径向激励车轮踏面，进行车轮振动频响函数和模态测试，并与未安装阻尼器的车轮测试数据进行对比，分析降噪阻尼器对车轮模态阻尼的提升效果及减振性能[15-16]。振动频响函数表征单位力所激起的振动加速度级，其峰值降低幅度越大，表明减振效果越好。该模态试验采用多点激励多点响应法，测试分析系统为LMS Test.Lab，力锤型号为B&K 8206，三向加速度计型号为PCB 356A16，单向加速度计型号为PCB 352C03；激励点位于车轮踏面中部，激励方向沿径向，模态分析采用PloyMax法，采样频率为12.8 kHz，频率分辨率为1 Hz，对力信号采用力窗处理，对加速度信号采用指数窗处理。

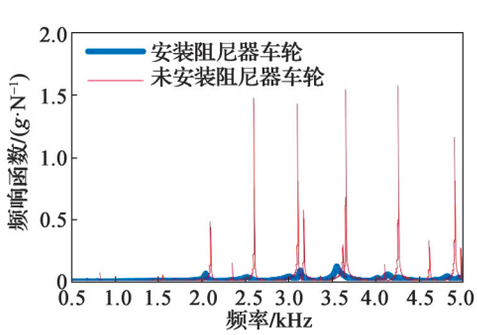
安装与未安装阻尼器的车轮前16阶模态阻尼比对比结果如图6(b)所示。由图6(b)可见，安装阻尼器后，车轮模态阻尼比提升约一个数量级。二者的车轮振动频响函数对比结果如图6(c)所示。由图6(c)可见，未安装阻尼器的车轮振动能量集中于近10个峰值频率处（频响函数峰值频率对应车轮模态频率），表明车轮模态被激发进而引起振动与结构噪声；安装阻尼器后，振动频响函数主要峰值均大幅降低，其中最大峰值由1.57 *g*/N降至0.12 *g*/N，降幅达92%。取得上述效果的原因如下：约束阻尼效应为车轮提供增量阻尼，并将



(a) 车轮模态试验



(b) 车轮模态阻尼比



(c) 车轮振动频响函数

图6 安装与未安装阻尼器的车轮模态试验

Fig. 6 Modal testing of wheel with/without dampers

振动能量转换为热能耗散；同时，动力吸振效应将车轮振动能量转移至阻尼器，从而有效抑制车轮振幅与声辐射，对峰值频率的减振降噪效果尤为显著。

4　结束语

针对宽温域环境下列车车轮的降噪需求，本文以提升车轮等效模态阻尼比为目标，研制出可显著降低车轮振动响应与辐射噪声的车轮降噪阻尼器。为实现高低温下的最佳降噪效果，需为橡胶阻尼材料匹配最佳的损耗因子和弹性模量，并提出宽温域、高阻尼、模量稳定的核心性能要求。通过优化苯基与甲基硅橡胶配比、添加增塑剂和苯基硅油、白炭黑填充剂改性、硫化体系优化等措施，使车轮阻尼器在宽温域内保持最佳动态性能。

通过 PloyMax 法模态测试与参数提取，验证了车轮阻尼器在−30~60 ℃宽温域内，阻尼比最大变化量不超过±0.002 5，固有频率变化率控制在 5% 以内，动态性能稳定。车轮安装该阻尼器后，振动频响最大峰值降低 92%，展现出优异的减振降噪性能。

参考文献：

[1] 刘玉霞, 温泽峰, 彭金方, 等. 不同阻尼形式对车轮振动声辐射特性的影响[J]. 噪声与振动控制, 2013(增刊 1): 95-100.
Liu Yuxia, Wen Zefeng, Peng Jinfang, et al. The effects of different forms of damping on the vibration and sound radiation characteristics of the wheel[J]. Noise and Vibration Control, 2013(S1): 95-100.

[2] 毛昆朋, 杨延峰, 徐超. 约束阻尼技术在高速列车车轮上的应用[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(2): 106-109.
Mao Kunpeng, Yang Yanfeng, Xu Chao. Applications of constrained damping technology on high-speed train wheels [J]. Railway Locomotive & Car, 2021, 41(2): 106-109.

[3] 邹强, 江波, 刘友存, 等. 阻尼车轮的降噪结构设计与应用[J]. 铁道车辆, 2016, 54(4): 6-8.
Zou Qiang, Jiang Bo, Liu Youcun, et al. Design and application of the noise reduction structure design of damping wheels[J]. Rolling Stock, 2016, 54(4): 6-8.

[4] Merideno I, Nieto J, Gil-Negrete N, et al. Theoretical prediction of the damping of a railway wheel with sandwich-type dampers[J]. Journal of Sound And Vibration, 2014, 333 (20): 4897-4911.

[5] Merideno I, Nieto J, Gil-Negrete N, et al. Influence of sandwich-type constrained layer damper design parameters on damping strength[J]. Shock and Vibration, 2016, 2016 (1): 7846369.

[6] 陈兵勇, 马国富, 阮家声. 宽温域高阻尼橡胶材料研究进展[J]. 世界橡胶工业, 2004, 31(11): 33-37.
Chen Bingyong, Ma Guofu, Ruan Jiasheng. Research progress of high-dampling rubber suitable for a wide temperature range[J]. World Rubber Industry, 2004, 31(11): 33-37.

[7] 王美豪, 王一民, 胡晓铜, 等. 硅橡胶阻尼材料的国内外研究进展[J]. 弹性体, 2018, 28(6): 63-67.
Wang Meihao, Wang Yimin, Hu Xiaotong, et al. Research progress on silicone rubber damping materials at home and abroad[J]. China Elastomerics, 2018, 28(6): 63-67.

[8] 卢珣, 李涛, 陶刚, 等. 改性硅橡胶宽温域阻尼材料研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(1): 92-97.
Lu Xun, Li Tao, Tao Gang, et al. Study of modified silicone rubber damping materials with a wide temperature range[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(1): 92-97.

[9] 田敏. 共混型宽温域高阻尼橡胶材料的制备与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
Tian Min. Study on high damping rubber material suitable for a wide temperature range prepared by blending[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.

[10] 张保岗. 宽温域高阻尼材料的制备与研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016.
Zhang Baogang. Preparation and research of high damping materials in wide temperature range[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2016.

[11] 穆洪帅, 肖同亮, 翟继芹, 等. 宽温域高阻尼硅橡胶材料研究及应用[J]. 特种橡胶制品, 2020, 41(5): 21-25.
Mu Hongshuai, Xiao Tongliang, Zhai Jiqin, et al. The study and application of silicon rubber with high damping property in wide temperature range[J]. Special Purpose Rubber Products, 2020, 41(5): 21-25.

[12] 黄瑞丽, 郭丙力, 卢珣, 等. 利用玻璃化温度梯度制备天然橡胶类高阻尼弹性体材料[J]. 橡胶工业, 2023, 70(2): 83-90.
Huang Ruili, Guo Bingli, Lu Xun, et al. Preparation of NR type high damping elastomer by using Tg gradient[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(2): 83-90.

[13] 潘锋, 彭立群, 林达文, 等. 低温和频率对橡胶弹性元件刚度性能的影响[J]. 橡胶工业, 2020, 67(5): 323-329.
Pan Feng, Peng Liqun, Lin Dawen, et al. Influence of low temperature and frequency on stiffness of rubber elastic components[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(5): 323-329.

[14] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
Fu Zhifang, Hua Hongxing. Modal analysis theory and application[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000.

[15] 郭涛. 车轮动力吸振器对城轨列车噪声抑制效果试验研究[J]. 机车电传动, 2014(5): 73-77.
Guo Tao. Experimental study on noise suppression effect of

wheel's tuned mass damper to metro vehicle[J]. Electric Drive For Locomotives, 2014(5): 73-77.
[16] 雷晓燕, 张鹏飞. 阻尼车轮减振降噪的试验研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(6): 60-64.
Lei Xiaoyan, Zhang Pengfei. Experimental study on reducing the noise and vibration of damped wheels[J]. China Railway Science, 2008, 29(6): 60-64.

Research on the application of wide temperature range high damping rubber in wheel noise reduction

ZHA Guotao, HU Jinchang, MU Hongshuai, WANG Xinlong

(Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412007, China)

Abstract: To meet the noise reduction requirements of wheel dampers across a wide temperature range, a rubber material featuring wide temperature range, high damping, and low modulus was developed. This material was synthesized using methyl silicone rubber and phenyl silicone rubber as base materials, augmented by phenyl silicone oil as a damping additive and other modification techniques. The results of dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) demonstrated that within the operating temperature range of −30 ℃ to 60 ℃, the fluctuations in the elastic modulus and loss factor of the modified material were controlled within ±20% of the target values. With the enhancement of the equivalent modal damping ratio of the wheel defined as the design optimization goal, a specific wheel noise reduction damper was subsequently engineered. The test results indicate that the damper exhibits stable dynamic performance over the specified wide temperature range and exerts a significant vibration reduction and noise reduction effect on the wheel, thereby meeting the application requirements under complex operating conditions.

Keywords: wide temperature range; damping rubber; wheel noise reduction; damper; modality; simulation

收稿日期：2025-04-09；修回日期：2025-10-01
责任编辑：钟　锋