

# 新能源汽车用超高频减震橡胶材料制备与性能研究

何铁桥 叶 建

温州德邦高分子科技有限公司 浙江 温州 325100

**【摘要】**随着新能源汽车向电驱化、轻量化及智能化方向发展，传统减震材料已难以满足电机高频振动、车身轻量化及 NVH 控制的特殊需求，本文针对新能源汽车特有的振动频谱特征，开发了基于氢化丁腈橡胶的超高频减震材料体系。通过分子链结构设计、填料网络优化及界面增容技术，实现了材料在 100-2000Hz 频率范围内动态性能的精准调控，研究结果表明，所制备材料在保持常规力学性能的基础上，动态损耗因子在 500Hz 处达到峰值 0.85，动静刚度比控制在 1.2 以内，同时具备优异的耐疲劳性能，该材料成功应用于电驱系统悬置及电池包悬挂系统，为新能源汽车高频减震提供了创新解决方案。

**【关键词】** 超高频减震；氢化丁腈橡胶；动态性能；新能源汽车；NVH 控制

DOI:10.12417/2705-0998.25.21.025

## 1 引言

当前，全球汽车产业正处于向新能源化转型的关键时期，新能源汽车的振动特性与传统燃油车存在本质区别，永磁同步电机作为主流驱动形式，其工作基频通常位于 400-600Hz 范围，同时包含丰富的谐波成分，高频振动能量可延伸至 2000Hz 以上，这种高频振动特性与传统内燃机 30-200Hz 的低频振动形成鲜明对比。此外为提升续航里程而实施的轻量化设计导致车身结构刚度相对降低，进一步放大了高频振动对驾乘舒适性的影响，研究表明，新能源汽车驾乘人员对高频噪音的敏感度是传统车辆的 1.5-2 倍，这使得 NVH 控制成为影响产品竞争力的关键因素。

传统减震橡胶材料由于其分子链运动机制的局限性，在高频频段表现出明显的性能衰减，天然橡胶（NR）和普通合成橡胶在超过 200Hz 频率时，动态损耗因子通常低于 0.3，无法有效耗散振动能量。同时传统材料的动静刚度比普遍大于 1.5，容易在特定频率下引发共振，加剧振动传递。这些固有缺陷促使我们必须开发新一代专门针对新能源汽车振动特性的超高频减震材料。

基于以上背景，本研究以氢化丁腈橡胶（HNBR）为基础体系，通过多尺度结构设计和制备工艺创新，系统开发了适用于 100-2000Hz 超宽频率范围的高性能减震材料。研究不仅关注材料的静态力学性能，更着重于动态力学特性的精准调控，旨在为新能源汽车提供全新的振动控制解决方案。

## 2 超高频减震橡胶的制备技术体系

### 2.1 分子链结构精细设计

本研究选用氢化丁腈橡胶（HNBR）作为基体，主要基于其独特的分子结构特征，氢化丁腈橡胶通过选择性加氢处理，将丁腈橡胶分子链中的碳碳双键部分饱和，既保留了极性氰基带来的分子链间强相互作用，又显著改善了材料的耐热老化性能和动态力学特性。

在分子链结构设计方面，我们通过精确控制三个关键参数

来优化材料的动态性能：首先，调控丙烯腈含量在 28%-34% 范围内，平衡材料的极性和分子链柔顺性。较高的丙烯腈含量可增强分子链间作用力，提升材料在高频振动下的能量耗散能力，但过量会降低链段活动性，影响低温性能。其次，通过加氢工艺控制残余双键数量在 5%-8% 范围内，这些残余双键可作为交联点参与硫化反应，同时为分子链提供适度的运动自由度。第三，采用分段加氢工艺，在分子链中构建梯度分布的饱和区与不饱和区，形成多层次的链段运动单元，为不同频率的振动能耗散提供多重机制。

这种分子链结构设计使材料在玻璃化转变温度以上较宽温度范围内保持较高的损耗因子，特别是在室温至 100°C 的使用温度区间内，材料能够有效耗散宽频振动能量。

### 2.2 填料网络架构精准调控

本研究采用炭黑-白炭黑复合填料体系，通过协同效应构建多级填料网络，炭黑主要提供基础的增强效果和能量耗散能力，选择 N330 和 N550 两种粒径的炭黑进行复配，既保证了足够的强度，又避免了过高的滞后生热。白炭黑则通过其表面硅羟基形成的氢键网络，为材料提供频率依赖性的动态性能。

在填料分散工艺方面，我们开发了多段混炼技术：首先在低温段（70-80°C）实现炭黑的基本分散，然后在中等温度（100-110°C）下加入硅烷偶联剂进行表面改性，最后在较高温度（130-140°C）下完成白炭黑的分散和硅烷化反应。这种分段混炼工艺确保了填料在橡胶基体中的纳米级分散，显著提升了填料-橡胶界面相互作用。

通过调控填料含量在 35-50phr 范围内，并优化炭黑与白炭黑的比例（在 2:1 到 1:2 之间调整），实现了填料网络密度的精确控制。适度的填料网络密度可确保材料在高频振动下既能通过填料-填料相互作用和填料-橡胶界面滑移有效耗散能量，又保持必要的弹性回复性能。

### 2.3 界面增容与交联密度调控

在界面增容方面，我们开发了反应型增容剂体系，通过在

增容剂分子中引入能够与填料表面基团和橡胶分子链同时发生作用的官能团，显著改善了填料-橡胶界面相容性。这种增容剂不仅提高了填料的分散性，更通过增强界面粘结强度，优化了应力传递效率，使材料在动态载荷下能够更有效地通过界面滑移耗散能量。

交联体系的设计着重于实现交联密度和交联键类型的平衡控制。采用过氧化物-共交联剂复合硫化体系，过氧化物提供稳定的碳-碳交联键，共交联剂则引入适量具有适度活动性的交联点。通过调节过氧化物与共交联剂的比例，将交联密度控制在  $4.0\text{-}6.0 \times 10^{-5}\text{ mol/cm}^3$  的优化范围内。这一交联密度范围既保证了材料具有足够的强度和耐疲劳性能，又为分子链段提供了适当的运动自由度，有利于高频振动的耗散。

在硫化工艺方面，通过精确控制硫化温度（165-175°C）和硫化时间（8-15分钟），确保交联反应充分进行的同时避免过度硫化。采用分段升温硫化工艺，先在较低温度下进行预硫化使交联网络均匀形成，然后在较高温度下完成最终硫化，这种工艺有效改善了交联网络结构的均匀性，避免了局部过密或过疏的交联区域。

### 3 材料性能表征与机理分析

#### 3.1 动态力学性能深度解析

通过先进的动态力学分析(DMA)技术，对材料在超高频范围内的动态性能进行了系统表征。测试结果显示，所开发的超高频减震橡胶在100-2000Hz频率范围内表现出优异的性能稳定性。在500Hz特征频率处，损耗因子达到峰值0.85，这一数值显著高于传统减震材料（通常低于0.5），表明材料在该频率区域具有极强的振动能量耗散能力。

频率扫描测试揭示了材料独特的动态刚度特性。在100-800Hz范围内，动态储能模量(G')随频率增加呈现平稳上升趋势，增长幅度控制在15%以内，显示出良好的频率稳定性。在800-2000Hz的高频区域，G'的增长趋势略微增强，但整体仍保持平稳，避免了传统材料在高频段出现的明显硬化现象。这种特性使得材料在宽频范围内都能提供一致的减震效果。

本研究开发的材料在100-2000Hz全频率范围内的动静刚度比稳定控制在1.0-1.2之间，远低于传统材料的1.5以上。这种低动静刚度比特性有效避免了共振现象的发生，确保了减震系统在整个工作频率范围内的稳定性。

温度依赖性研究显示，在-40°C至130°C的温度范围内，材料动态性能的变化率不超过基准值的±15%，表现出卓越的温度稳定性。特别是在新能源汽车常见的工作温度区间(-20°C至80°C)，材料性能波动更是不超过±8%，这种温度不敏感性对保证整车在不同气候条件下的NVH性能一致性具有重要意义。

#### 3.2 常规力学性能与耐久性评估

测试数据显示，材料的拉伸强度达到18-22MPa，拉断伸长率为350-450%，撕裂强度保持在45-55kN/m范围内，这些指标确保了材料在静态载荷下具有足够的结构完整性。

在70°C×22h的标准测试条件下，材料的压缩永久变形率稳定在12%-15%范围内，显著优于传统材料的20%以上。在更严苛的100°C×70h条件下，压缩永久变形率仍能控制在25%以内，显示出优异的热稳定性和抗蠕变性能。

通过100万次轴向疲劳试验，材料动态性能保持率超过90%，静态力学性能保持率也达到85%以上。微观结构分析表明，经过长期动态载荷作用后，材料内部的填料网络结构和交联网络仍保持完整，仅出现微小的界面调整，这种结构稳定性是材料卓越耐疲劳性能的根本原因。

#### 3.3 环境适应性与老化性能研究

新能源汽车的使用环境复杂多变，要求减震材料具备优异的环境适应性。在热氧老化研究中，将材料置于125°C环境中持续暴露168小时后，力学性能保持率超过80%，动态性能变化率控制在±10%以内。这种优异的热稳定性主要归因于HNBR基体的饱和分子链结构和优化的防老化体系。

耐油性能测试显示，在125°C齿轮油中浸泡168小时后，材料的体积变化率控制在+3%至+5%范围内，力学性能保持率超过80%。这种适度的溶胀行为不仅不会对材料性能产生负面影响，反而有助于在油液环境中维持稳定的动态特性。

### 4 在新能源汽车减震系统中的应用验证

#### 4.1 电驱系统悬置应用研究

驱动电机是新能源汽车最主要的振动源，其悬置系统的性能直接影响整车的NVH表现。将本研究开发的超高频减震材料应用于永磁同步电机的悬置系统，通过实车测试验证其减震效果。

测试结果显示，在电机基频振动区域(400-600Hz)，采用新型减震材料的悬置系统使振动传递率降低了40%-50%。特别是在电机启动和加速过程中出现的600-800Hz谐波振动区域，振动隔离效果更为显著，传递率降低幅度达到55%以上。这种优异的振动隔离性能显著改善了车内高频噪音水平，在电机全负荷运转工况下，驾驶员耳旁噪音降低3.5dB(A)，达到了一流的静音效果。

耐久性测试表明，经过10万公里等效台架试验后，悬置系统的动态性能衰减率不超过8%，远低于传统材料的20%衰减率。这种性能稳定性确保了车辆在整个使用寿命期内都能维持优异的NVH性能，避免了因材料老化导致的振动噪音问题。

#### 4.2 电池包悬挂系统创新应用

动力电池包作为新能源汽车中质量最大的单体部件，其悬

挂系统的减震性能不仅影响驾乘舒适性，更直接关系到电池系统的安全性和使用寿命。将超高频减震材料应用于电池包悬挂系统，重点解决路面激励引发的高频振动问题。

实车道路测试表明，在粗糙路面行驶条件下，采用新型减震材料的电池包悬挂系统使电池包的振动加速度响应降低了35%-40%。频率分析显示，在100-300Hz的路面激励主要频段，振动衰减效果最为明显。这种有效的振动隔离显著降低了电池模组和连接件所受的动态应力，有助于延长电池系统的使用寿命。

温度监测数据显示，在连续高速行驶工况下，电池包内部温度波动幅度降低了25%，这表明减震材料的优异性能减少了振动生热对电池温度管理的影响。同时，电池管理系统(BMS)的记录数据显示，电池包的电压一致性指标改善了15%，证明良好的振动环境有利于保持电池性能的稳定性。

## 5 结论

本研究通过系统的材料设计和工艺创新，成功开发出适用于新能源汽车的超高频减震橡胶材料。主要结论如下：

首先，基于氢化丁腈橡胶的分子链结构设计，通过精确控制丙烯腈含量、残余双键数量和加氢梯度，构建了具有多层次链段运动单元的基础体系，为材料提供优异的超高频动态性能。优化后的基体材料在500Hz特征频率处的损耗因子达到

0.52，较传统材料提升40%。

其次，创新的填料网络架构设计和界面增容技术，实现了填料在橡胶基体中的纳米级分散和稳定的界面相互作用。炭黑-白炭黑复合填料体系与反应型增容剂的协同作用，使材料在保持适宜刚度的同时，具备了卓越的能量耗散能力。

第三，通过过氧化物-共交联剂复合硫化体系和分段升温硫化工艺，构建了均匀稳定的三维交联网络，将交联密度精确控制在 $4.0\text{-}6.0 \times 10^{-5}\text{ mol/cm}^3$ 的优化范围内，确保了材料在动态载荷下的性能稳定性。

性能研究结果表明，所开发材料在100-2000Hz超宽频率范围内表现出优异的动态特性，损耗因子在500Hz处达到峰值0.85，动静刚度比稳定控制在1.2以内。在复杂环境条件下，材料性能变化率不超过基准值的±15%，显示出宽广的环境适应性。

实车应用验证表明，在电驱系统悬置、电池包悬挂系统等关键部位，材料均表现出显著的减震效果。电机振动传递率降低40%-50%，电池包振动加速度响应降低35%-40%，为提升整车NVH性能提供了有效解决方案。

本研究开发的材料体系和制备技术为新一代减震材料的发展奠定了坚实基础，对推动新能源汽车产业技术进步具有重要意义。

## 参考文献：

- [1] 张华琳.改性减震橡胶复合材料的制备及其性能提升机理研究[D].石家庄铁道大学,2023.
- [2] 崔茗涵.汽车橡胶材料减震系统设计与应用[J].中国新技术新产品,2021,(21):83-85.
- [3] 张剑平,张新萍,蔡磊,等.高疲劳寿命减震橡胶的结构与性能研究[J].高分子通报,2019,(02):44-51.
- [4] 莫浩杰.新能源汽车驱动电机NVH性能优化路径探析[J].汽车测试报告,2024,(23):155-157.