

特约专栏

# 橡胶复合材料在建筑隔震领域的应用

赵秀英, 王 琪, 张 志, 曹仁伟, 张立群

(北京化工大学 北京市新型高分子材料制备与加工重点实验室, 北京 100029)

**摘 要:** 我国地域辽阔, 许多地区位于地震带上, 采用隔震技术提高建筑物、桥梁等的抗震能力以避免和减少地震事件后人民生命财产损失, 具有重大意义。应用天然橡胶制备的隔震支座, 具有很好的竖向刚度和水平等效刚度, 但等效阻尼比非常低, 需要增加另外的阻尼器或灌注铅芯来提高阻尼比。为了解决这一问题, 工程技术人员通过共混、共聚、添加小分子等方式制备具有优异综合力学性能和阻尼性能的橡胶复合材料, 并将其应用在隔震体系中, 促进了隔震技术的发展。介绍了隔震技术的原理和分类, 特别是叠层橡胶支座隔震体系的分类和研究现状。综述了隔震支座用橡胶复合材料, 包括: 单一组分橡胶、多元组分橡胶、有机小分子杂化材料、磁流变弹性体等的研究现状和应用情况。

**关键词:** 橡胶; 复合材料; 隔震; 阻尼; 支座

中图分类号: TQ336.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2018)08-0597-08

## Application of Rubber Composites in Building Seismic Isolation

ZHAO Xiuying, WANG Qi, ZHANG Zhi, CAO Renwei, ZHANG Liquan

(Key Laboratory of Beijing City on Preparation and Processing of Novel Polymer Materials,  
Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Many areas of China are located in the seismic zone, the use of isolation technology to improve the seismic capacity of buildings or bridges for avoiding and reducing the loss of people's lives and property after the earthquake is of great significance. Natural rubber bearings has good vertical stiffness and shear stiffness, but the equivalent damping ratio is very low, and additional dampers or infused lead cores are needed to increase the damping ratio. In order to solve this problem, engineers are developing rubber composites with excellent comprehensive mechanical properties and damping properties by blending, copolymerizing and adding small molecules, and widely using them in isolation systems, which greatly promotes the development of isolation technology. This paper firstly introduces the principle and classification of the isolation technology, especially the classification and current status of the laminated rubber bearing isolation system. Finally, the rubber composite materials for seismic isolation bearings are reviewed, including the research status and application of single component rubber, multicomponent rubber, organic small molecular hybrid materials and magnetorheological elastomers.

**Key words:** rubber; composites; seismic isolation; damping; bearings

### 1 前 言

我国地震活动具有频度高、强度大、震源浅、范围广的特点, 是一个震灾严重的国家<sup>[1]</sup>。据统计, 地震时 90% 的伤亡都是由建筑物的倒塌造成的。因此, 增强建筑物的抗震能力是防震减灾的必要手段。20 世纪 80 年

代, 隔震技术迅速发展, 指的是在结构底部与基础之间设置柔性隔离装置和阻尼装置, 将地震能量隔离吸收的一种新型抗震技术。这种技术应用于地震高发区的建筑物、桥梁和一些高抗震需求的领域如核设施、液化气储存罐、医院、指挥中心等的抗震防护, 可以对建筑物内部的家具装修、对位移和加速度非常敏感的仪器设备和一些无法固定的非结构件起到很好的保护作用, 现如今已在世界各地大量应用, 是发生大型罕见地震事件后避免生命财产损失的有效技术<sup>[2, 3]</sup>。

20 世纪 70 年代, 以天然橡胶为主体材料的叠层橡胶支座的发展让隔震成为现实<sup>[4]</sup>。80 年代早期, 橡胶技术的发展使得多种合成橡胶和橡胶复合材料被应用于高

收稿日期: 2018-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51320105012)

第一作者: 赵秀英, 女, 1971 年生, 副教授

通讯作者: 张立群, 男, 1969 年生, 教授, 博士生导师, Email:  
zhanglq@mail.buct.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2018.08.05

阻尼橡胶支座<sup>[5]</sup>。新的隔震技术的出现也必定伴随新的橡胶复合材料的开发,橡胶复合材料已经广泛应用于隔震领域,是隔震领域不可或缺的重要材料。本文简述了隔震技术的原理与分类,综述了隔震支座用橡胶复合材料,包括:单一组分橡胶、多元组分橡胶、有机小分子杂化材料、磁流变弹性体等的研究现状和应用情况,分析了其优点和缺陷,为之后隔震领域用橡胶复合材料的开发提供了思路。

## 2 隔震技术原理及其分类

隔震技术是 20 世纪 80 年代快速发展起来的一种抗震技术。对于中低层结构建筑,其自身的自振周期位于地震能量最大的频段,为降低地震对建筑物的损害,如图 1a 所示,在建筑中设置隔震层,将建筑物的上部与基础柔性隔离,延长自振周期至长周期(2~4 s),从而减少上部分建筑物的反应加速度,并且通过增大结构的阻尼,有效吸收了地震传导的能量,因而保证了建筑物的安全<sup>[6]</sup>。如图 1b 所示,不同的地震在低频段都有较高的反应加速度,结构建筑物和隔震建筑物在地震中有不同的震动状态。固定的结构建筑物自振周期处于低频段,地震发生时会产生剧烈晃动。与之相比,带有隔震体系的建筑物可以有效降低加速度反应和位移反应,减少地震对建筑物的损害。

目前主要研究的隔震技术体系有:叠层橡胶支座隔震体系、摩擦滑移隔震体系、滚动隔震体系、智能隔震

体系以及复合隔震体系<sup>[7]</sup>。其中建筑中应用最多的是叠层橡胶支座隔震体系。

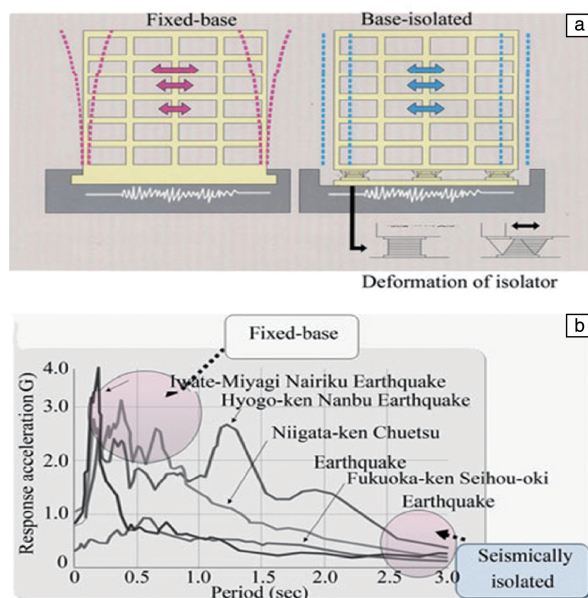


图 1 建筑隔震原理(a)及不同地震的加速度反应谱图(b)<sup>[6]</sup>

Fig. 1 Principle schematic of building's seismic isolation (a) and response acceleration of different earthquakes (b)<sup>[6]</sup>

### 2.1 叠层橡胶支座隔震体系

叠层橡胶隔震支座在建筑物和桥梁减震中的应用十分广泛,常用的隔震支座有普通叠层橡胶支座、铅芯叠层橡胶支座、高阻尼叠层橡胶支座等<sup>[9]</sup>,结构示意图见图 2。

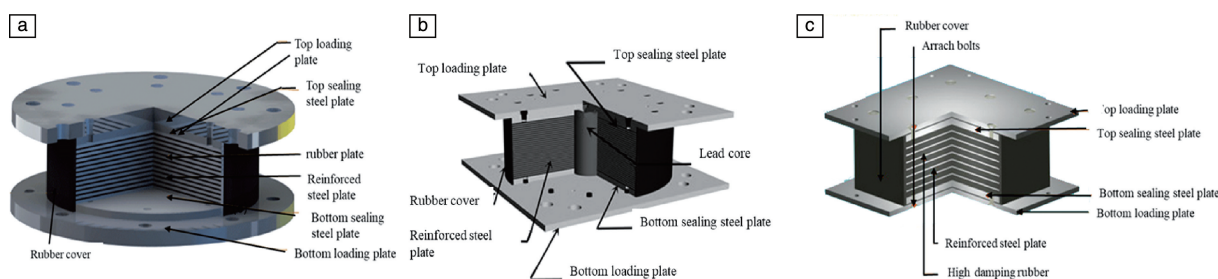


图 2 普通叠层橡胶支座(a), 铅芯叠层橡胶支座(b), 高阻尼橡胶支座(c)

Fig. 2 Natural rubber bearings (a), lead rubber bearings (b) and high damping rubber bearings (c)

普通叠层橡胶支座(natural rubber bearings, NRB)是由橡胶层和加强板层层交替经高温、高压整体硫化粘结而成<sup>[10]</sup>。支座受竖向压力时,橡胶层的径向受到加强板的约束减小变形,因此可以提供较大的竖向承载力而不会产生较大的变形;当地震发生时,因为橡胶的柔性,可以有效隔离水平方向上的运动分量。叠层橡胶支座的橡胶层多为天然橡胶,加强层多为钢板,为减少成本,有的也使用塑料板或者碳纤维、玻璃纤维增强的塑料板。以天然橡胶为主体材料的普通叠层橡胶支座的等效阻尼

比一般在 2%~3% 之间,因此在国内隔震设计中经常忽略天然橡胶的粘滞阻尼,在使用过程中配合粘滞阻尼器、粘弹阻尼器或油阻尼器来提升等效阻尼比,以实现震动过程中的能量吸收<sup>[11]</sup>。

铅芯叠层橡胶支座(lead rubber bearings, LRB)是在普通叠层橡胶支座的基础上插入铅芯,由于铅芯的存在,可以提高支座的阻尼性能和初始刚度,提升支座的使用寿命<sup>[12]</sup>。LRB 虽然可以提高天然橡胶支座的等效阻尼比至 10%~15%,但铅芯低温易结晶,常规低周期疲劳作

用下,铅芯会产生剪切疲劳破坏,经测试,支座经5000次小位移疲劳试验后,等效阻尼比下降约25%。并且铅芯的冶炼、精炼以及使用过程中对环境的污染无法避免,因此制作高阻尼橡胶支座对环境和人类生命健康具有现实意义<sup>[13]</sup>。

高阻尼橡胶支座(high damping rubber bearings, HDR)结构与普通叠层橡胶支座相同,但普通叠层橡胶支座用天然橡胶,基本不使用补强剂补强,而HDR高阻尼橡胶层的制备是在生胶混入炭黑与其他补强剂,或者各种种类橡胶共混、共聚。对比普通叠层橡胶支座,等效阻尼比可以提高至12%~20%<sup>[14]</sup>。由于填料的加入会让橡胶复合材料的硬度和剪切模量上升,很难同时实现复合材料的高阻尼和低剪切模量。

除了上述3种主要橡胶支座,还有厚橡胶层橡胶支座、纤维增强板橡胶支座等有特定功能的支座。厚橡胶层可以产生良好的竖向隔离能力,具有低竖向刚度的橡胶支座,可以降低强震过程中的竖向响应加速度,实现环境微振动水平和竖向同时隔离,不过该支座仅限于用于低层建筑物<sup>[15]</sup>。Kelly等<sup>[16]</sup>将纤维增强复合材料替换钢板,开发出纤维加劲橡胶隔震支座,降低了支座的成本,可以应用于广大的经济欠发达地区。同时也有用纤维增强工程塑料板代替钢板的夹层橡胶隔震支座。

## 2.2 其他隔震体系

摩擦滑移隔震技术是应用最早的隔震技术,基本原理是将上部结构和建筑物基础隔开,在它们之间设置滑移面,在发生地震时,滑移层与基础解耦,整体水平滑移并通过摩擦耗能。优点为简单高效、造价低,但是滑移层回复能力差。为了弥补这一缺陷,可以在滑动层周围设置限位装置。限位装置包括由弹簧和阻尼组成的限位器和刚性限位壁,在中小地震作用下,表现为纯滑动摩擦隔震,在大震或多次地震作用下,限位器的限位功能可以防止滑动层的大幅度位移<sup>[17]</sup>。加州伯克利分校研究了摩擦摆隔震支座(friction pendulum system, FPS)<sup>[18]</sup>,FPS将传统滑移平面底座改为曲面底座。该体系具有传统摩擦隔震系统的优势,同时底座的弧面保证良好的自动复位功能。

滚动隔震技术是一种水平隔震技术,在建筑物上部与基础之间铺设一层滑动性能好的滚珠或者滚轴。其起到隔离作用的基本原件为双凹形表面组成的主体和插入的滚珠或滚轴<sup>[19]</sup>。滚珠或者滚轴只能沿着特定方向运动,运动之后产生势能,产生像钟摆一样的居中效应提供复位能力。研究表明,滚动隔震技术具有稳定性好、显著的隔震效果。但滚动隔震技术的位移能力受到滚动表面几何形状的限制,而且对于复位能力不好的系统,

二次地震或者余震让位移超出阈值,因此需要配合阻尼器使用。

为增加对地震的响应,以抵抗具有大位移和长周期脉冲的近底层地震导致的基础隔震装置的过度应变破坏,发明了可变摩擦阻尼器和磁流变阻尼器,称为智能隔震体系。该技术可以实时控制基础隔离系统的水平刚度(即基础隔离装置的剪切特性),在地震波频率峰值时控制隔震装置解耦合,保护建筑物的结构和内部物体。

每一种隔震技术都有自己的优势与缺点,在同一隔震结构中利用不同的隔震装置以并联或串联的方式组合起来,并进行优化,称为复合隔震体系。它可以兼收各技术的优点,满足建筑物隔震需求,应用广泛<sup>[20]</sup>。

## 3 隔震用橡胶复合材料

隔震装置是隔震层的主要部分,同时也是实现隔震的关键装置,通过采用新型结构设计或者使用新材料能够让隔震装置满足更高的隔震要求<sup>[21, 22]</sup>。为了验证新型隔震装置的实际施工可行性及其隔震效果,应按照我国的国家标准对隔震装置进行测试。以建筑用高阻尼橡胶支座为例,在进行隔震体系设计时,应该按照GB 20688.3—2006《橡胶支座 第3部分:建筑隔震橡胶支座》通过相关性实验评估支座在竖向压力下的剪切性能、极限性能、拉伸性能、耐久性,比如竖向刚度 $K_v$ 、水平等效刚度 $K_h$ 和等效阻尼比 $h_{eq}$ 等<sup>[23]</sup>。

满足这些需求则需要材料兼具高强度、高柔性、高弹性、高阻尼的特点。高柔性是为了保证支座有良好的横向位移能力和大的位移量,充分起到隔震的效果;而高强度是为了保证橡胶材料在产生大变形时具有高的抗破坏能力;高弹性既是高柔性的伴生性能,又是支座长期处于高压态下不产生大的永久变形的保证;高阻尼则是为了满足高性能支座所提出的高度耗能减震的要求。从高分子物理和复合材料理论进行分析可以发现:材料的高柔性与高强度不易同时获得,而高弹性与高阻尼则更是一对矛盾而难以兼顾。近些年,隔震支座用高性能橡胶复合材料方面取得了很多优秀的研究成果。

### 3.1 单组分橡胶在隔震支座中的应用

天然橡胶(NR)具有高柔性、高弹性、高拉伸强度、高撕裂强度和易加工性能等优点,是隔震支座中应用最多的一种橡胶。普通叠层橡胶支座主要采用天然橡胶。NR分子链柔顺,具有高弹性和低压缩永久变形性能,有利于减少支座在水平方向上的变形;同时NR具有拉伸结晶特性,在高水平形变下,NR可以提供支座高的水平刚度,满足普通叠层橡胶支座的力学性能要求。但是NR分子链内摩擦小,阻尼性能差,对传导的地震能量的吸



收非常少,因此普通叠层橡胶支座需要配合阻尼器使用。另外 NR 分子链中含有许多双键,耐热氧老化性能差,需要对 NR 制作的支座进行防老化处理。赵录杰<sup>[24]</sup>将微米级羰基铁粉均匀混入 NR,制备的橡胶隔震支座与同款未掺杂的隔震支座相比,其阻尼比有了明显的提升。在低频条件下阻尼比的提高尤为明显,其最大增加量可达 68%,有效改善了普通叠层橡胶支座的阻尼性能。胡浩等<sup>[25]</sup>将碳纳米管作为纳米阻尼材料与石油树脂一起加入 NR 中,大幅度提高了橡胶的阻尼性能。在室温、应变为 50%~100%、频率为 1 Hz 时,该复合材料的损耗因子大于 0.3,拉伸强度不小于 10 MPa,拉断伸长率不小于 500%,其性能达到了隔震支座用橡胶材料物理性能的国家标准要求。王刚鹏等<sup>[26]</sup>研究了 NR/CNTs/炭黑/石油树脂复合材料的阻尼性能,其损耗因子在低频大应变下均大于 0.3,而且明显降低了硬度,当石油树脂质量份数在 10~30 范围内时,该复合材料的拉伸强度>10 MPa,断裂伸长率>500%,可选为隔震支座用橡胶材料。

氯丁橡胶(CR)有比 NR 更好的耐候性和耐化学腐蚀性能,因此氯丁橡胶支座多用于公路桥梁等地方。沈小俊等<sup>[27]</sup>研究了盐冻条件下氯丁橡胶支座的耐压性能,盐冻会导致橡胶支座的局部变形变大,弹性阶段缩短,竖向刚度下降,更容易发生脆性破坏。张延年等<sup>[28]</sup>研究了热氧老化作用下氯丁橡胶支座的耐压性能,结果表明支座易受热氧老化的影响,压缩弹性模量下降,极限抗压强度下降。总体而言,氯丁橡胶支座虽然有不错的机械性能,但是由于低温结晶性和盐冻或热氧条件下的老化问题,应用较少,而且氯丁橡胶价格昂贵也限制了进一步的应用。

与 NR 相比,丁腈橡胶(NBR)的耐低温性差、分子链柔顺性稍低,阻尼性能好。袁涌等<sup>[29]</sup>在 NBR 中添加湿式云母粉和纳米级硬沥青颗粒,制备了具有较高竖向承载能力和水平变形能力的复合材料,当地震发生时呈现良好的可复位性,其中湿式云母粉与常规的炭黑填充剂相比,能够有效提高 NBR 的耐曲挠性能和耐热老化性能,适用于环保型超高阻尼隔震橡胶支座并且使用寿命更长。

其他的橡胶材料也有在隔震装置上使用,但是由于它们大多是某种特性突出,而综合性能不佳,很少单独在隔震装置上使用。例如氯化丁基橡胶(CIIR),阻尼性能优异,但是机械性能和加工性能差,单独在隔震装置上使用不能达到国家标准对隔震支座性能的要求。郭大通等<sup>[30]</sup>将石油树脂(PR)加入 CIIR 中,PR 作为阻尼功能助剂,PR/CIIR 复合材料的拉伸强度和压缩模量逐渐减小,拉断伸长率和压缩永久变形逐渐增大。PR/CIIR 复

合材料的有效阻尼温域移向高温区并有效拓宽,  $\tan\delta \geq 0.3$  的阻尼温域宽由 70.7 °C 增大到 93.5 °C,阻尼性能得到明显改善,所制备的高阻尼成品支座样品的等效阻尼比为 18.2%,超过了 15% 的标准。

### 3.2 多元组分橡胶在隔震支座中的应用

结合 NR 可以拉伸结晶、强度高的优势,张宏生<sup>[31]</sup>将 NR 与具有高阻尼特性的丁基橡胶(IIR)共混制备兼备两者优点的橡胶复合材料并应用于高阻尼橡胶支座。采用 IIR 的预硫化工艺,解决了 NR/IIR 复合材料的硫化交联不能同步的问题, NR/IIR 混合体系的交联网络得到改善,制备了比未预硫化体系物理机械性能更好的复合材料。钟枢等<sup>[32]</sup>制备了 NR/CIIR 橡胶复合材料并应用于桥梁支座,依据 JT/T4-2004《公路桥梁板式橡胶支座标准》测试,结果显示完全符合国家标准,该橡胶支座在较大的剪切应力和压力下没有发生任何损坏。张保生<sup>[33]</sup>等将溴化丁基橡胶(BIIR)与 NR 共混制备了 NR/BIIR 复合材料,并研究了不同填料对共混物物理性能、老化和阻尼性能的影响,结果显示炭黑 N330 填充橡胶共混物物理性能最佳,但抗老化和阻尼性能下降;采用云母粉部分代替炭黑能显著提高耐热氧老化性能,这对于提高支座的使用寿命有重要意义。

Qin 等<sup>[34]</sup>通过在 NR 中并用不同环氧度的环氧化天然橡胶(ENR,环氧度分别为 25%, 40%, 50%)来扩大 NR 的阻尼温度范围。复合材料结构和制备过程如图 3a 所示, NR 和 3 种 ENR 按一定顺序排列,制得 NR/ENR-25/ENR-40/ENR-50 四元层状梯度材料,层状梯度材料之间相对较窄的  $T_g$  差异和 NR 与 ENR 之间的高相容性是复合材料性能优异的主要原因。图 3b 表明 3 种不同环氧度的 ENR 的存在可以有效地拓宽 NR 的有效阻尼温度范围,并且图 3c 显示层数为 32 时,四元层状梯度材料的  $\tan\delta$  值峰值可高达 1.815,有效阻尼温度范围为 -24.8~44.9 °C,具有最佳的阻尼性能。牛凯晶等<sup>[35]</sup>研究了 NR/NBR/ENR 三元橡胶复合材料性能以及在隔震支座的应用,以 NR 为连续相, NBR 为分散相, ENR 为相容剂,降低了 NBR 的聚集,提高了 NR 和 NBR 之间的相容性,在 ENR 含量达到 10% 时相容性最佳,并且测试 NR/NBR/ENR-50 的拉伸强度是 22.84 MPa,断裂伸长率为 652%,  $\tan\delta$  大于 0.3 的阻尼温域在 20 °C 左右,阻尼性能优异,并且由于 NR 和 ENR 的结晶性能,在大应变下,结晶程度增大,拥有较高的力学性能,适用于高阻尼橡胶支座。

吴结义等<sup>[36]</sup>将少量顺式-聚异戊二烯(TPI)与 NR 并用,研究发现,随着 TPI 用量的增加,硫化胶的压缩疲劳温升和压缩永久变形逐渐降低,屈挠疲劳寿命增加了 26%,并且硫化胶的静刚度增大。应用于隔震支座橡胶



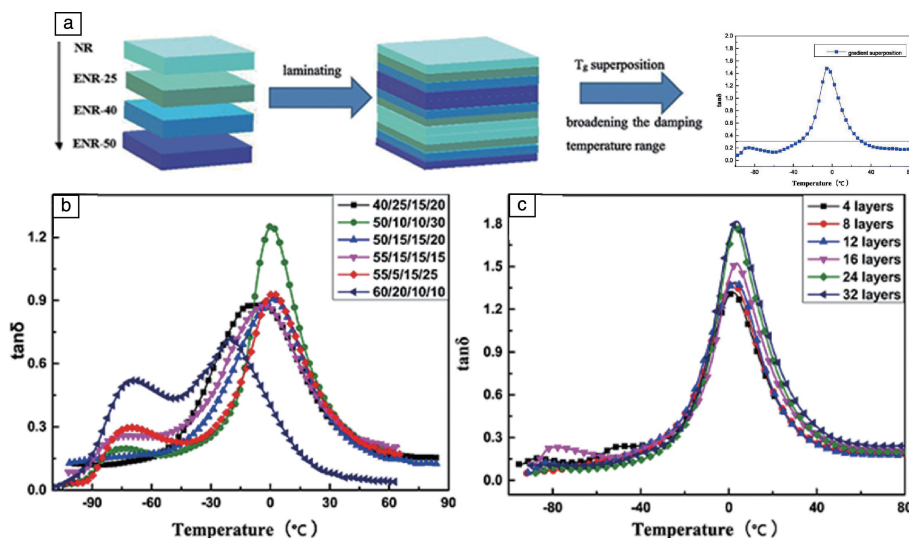


图3 四元层状梯度阻尼材料的制备过程(a), 不同混合比的 NR/ENR-25/ENR-40/ENR-50 层状梯度阻尼材料的  $\tan\delta$ - $T$  曲线(b), 不同层数 NR/ENR-25/ENR-40/ENR-50 层状梯度阻尼材料的  $\tan\delta$ - $T$  曲线(c) [34]

Fig. 3 Preparation of layered gradient damping material (a),  $\tan\delta$ - $T$  curves of NR/ENR-25/ENR-40/ENR-50 blends with different blend ratios (b),  $\tan\delta$ - $T$  curves of NR/ENR-25/ENR-40/ENR-50 layered gradient damping materials with different number of layers (c) [34]

层, 可以改善普通叠层橡胶支座的初始刚度和阻尼性能。曾令子<sup>[37]</sup>等在 NR/顺丁橡胶 (BR) 共混物中添加高阻尼石油树脂、镁、补强剂等, 得到的 NR/BR 橡胶复合材料, 在  $-65\sim 68\text{ }^{\circ}\text{C}$  超过  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  的宽温域范围内具有高阻尼性能, 并且拉伸强度和断裂伸长率达到国家标准对支座的要求, 适用于公路、桥梁高阻尼橡胶隔震支座。

### 3.3 有机小分子杂化技术应用于高阻尼橡胶支座

近年来, 有研究发现在聚合物共混体系中加入小分子有机化合物, 如受阻酚类抗氧化剂 (AO-60、AO-80) 或受阻胺类材料 (如 DZ) 可以有效提高橡胶复合材料的阻尼性能和阻尼温域。对 AO-80/氯化聚乙烯 (CPE) 体系研究表明, 受阻酚有 3 种相结构, 即非晶相、高度有序相和室温下的结晶相, 如图 4a 所示, 在复合体系中, 一部分受阻酚溶解到基质中, 大部分形成 AO-80 富集域, 并且在 AO-80 和 CPE 间形成分子间氢键。从图 4b 动态热机械分析 (DMA) 图可以清晰看到两个损耗峰, 证明体系中分相和添加 AO-80 带来的优异的阻尼性能。这是由于在 AO-80 自身的玻璃化转变和分子间氢键断裂的二级转变, 可以让复合材料有良好的阻尼性能和形状记忆效应<sup>[38]</sup>。

Zhao 等<sup>[39-42]</sup>将受阻酚 AO-60 加入 NBR 基体中, 结果表明在加入 AO-60 后, NBR 分子链与 AO-60 形成氢键并构成超分子网络结构, AO-60 富集相中分子间氢键的裂解在高温区还引起两个副损耗峰, 有效提高了 NBR 的阻尼温域。之后为改善 NBR 与 AO-60 相容性问题, 加入溴化酚醛树脂用来交联 NBR, 改善了相容性。AO-60 的

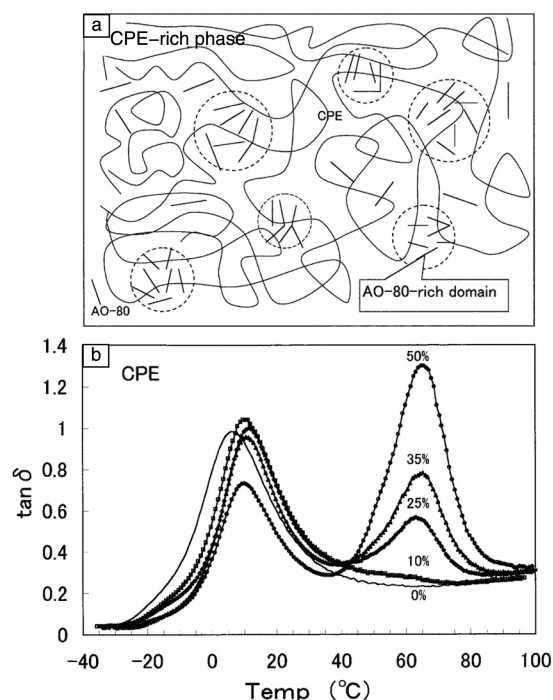


图4 CPE/AO-80 分子链形态的示意图(a)及  $\tan\delta$ - $T$  曲线(b) [38]

Fig. 4 Schematic illustration of CPE/AO-80 molecular chain morphology (a) and curves of  $\tan\delta$ - $T$  (b) [38]

大量加入可以提高 NBR 的阻尼性能, 但 AO-60 大量富集形成的晶区会降低 NBR 的力学性能。向平等<sup>[43, 44]</sup>在 NBR/AO-60 体系中引入塑料相 PVC, 加入适当比例的 PVC, 减少 AO-60 的用量, 橡胶复合材料形成海岛结构,

连续相为 NBR, 分散相为 PVC/AO-60, 共混物的阻尼温域宽并且力学性能优良。张耿<sup>[45]</sup>在 NBR 中添加不同含量的受阻酚 AO-70 小分子, 通过分子模拟进行理论计算, AO-70 添加量为 109 份时, 体系的阻尼性能提高了 66.9%, 与 DMA 测试结果相同。杨静娜等<sup>[46]</sup>制备了 NR/NBR/AO-80 橡胶复合材料, 综合力学性能优异, 如图 5 所示, NR 为连续相, NBR/AO-80 为分散相, 呈椭圆形分散在连续相中, NR 相可以拉伸结晶, NBR/AO-80 相可以拉伸取向, 拉伸强度 20 MPa 以上, 拉伸伸长率 700%, 而且该复合橡胶相比于天然橡胶材料具有高阻尼性能,  $\tan\delta$  大于 0.3 的温域变宽且往室温方向移动, 且阻尼性能随着剪切频率上升。为提高 NR 与 NBR 相容性, 添加了环氧化度为 35% 的 ENR, 结果表明, 添加量为 14 份时, 复合材料的综合性能最好。张凯等<sup>[47]</sup>使用 NR/NBR/AO-80 橡胶复合材料制备了支座并进行标准化测试, 结果显示, 复合材料拉伸强度大于 20 MPa, 拉伸伸长率大于 500%,  $K_V$ 、 $K_h$  和  $h_{eq}$  符合桥梁支座用橡胶材料国家标准要求。宋洪松等<sup>[48, 49]</sup>研究了不同丙烯腈含量的 NBR 与不同受阻酚共混制备的复合材料的性能, 发现 AO-60、AO-80 与不同丙烯腈含量的 NBR 相容性不同, 并影响阻尼性能和力学性能。赵秀英等<sup>[50]</sup>制备了炭黑增强的受阻酚 AO-80/CIIR/NBR 复合材料, 结果表明 AO-80

与 CIIR/NBR 共混胶相容性良好, 材料有两个阻尼峰, NBR 相阻尼峰向高温方向移动且最大损耗因子从 1.24 提高至 2.02, 损耗峰面积不断扩大, 复合材料显示优异的阻尼性能。同时由于炭黑的加入, 虽然会导致阻尼性能一定程度下降, 但会大幅度增强复合材料的力学性能, 可以应用于高阻尼橡胶隔震支座领域。

### 3.4 磁流变弹性体在隔震支座中的应用

磁流变弹性体(magnetorheological elastomer, MRE)是一类新型的磁流变智能材料, 是将磁流液的液态母体用弹性体材料代替, 制备磁性粒子分散在弹性体中的复合材料<sup>[51, 52]</sup>。MRE 基体通常是天然橡胶或硅橡胶。在制造过程中, 需要使用胶乳状天然橡胶或者加热将硅胶硫化成橡胶状。硅橡胶具有良好的耐极端温度, 能够在  $-55 \sim 300$  °C 的温度范围内良好服役。在极端温度下, 拉伸强度、伸长率、撕裂强度和压缩形变可以远远优于传统橡胶。硅油通常用作 MRE 的添加剂, 当硅油分子进入基体时, 基体分子之间的间隙增加, 分子的粘连减少, 提高了基体的塑性和流动性<sup>[53, 54]</sup>。

Tian 等<sup>[55]</sup>采用一种 SI-69 改性的  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  纳米粒子填充 NBR 制备了新型永磁橡胶复合材料。永磁性橡胶复合材料显示出高拉伸强度(约 15.8 MPa)和邵氏 A 硬度(约 77), 表明磁性  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  纳米粒子可提高橡胶的机械性能。此外, 永磁性橡胶复合材料由于基于永久磁场的脉冲力而在宽频率范围内具有高损耗因子并且具有高负载量, 这为其作为用于隔振器的新型智能集成材料提供了潜力。

Li 等<sup>[56]</sup>利用硅橡胶、378364 型硅油和 C3518 型碳基铁颗粒制备 MRE 材料并进行一系列测试, 结果表明软磁共振材料在 0.44 T 的磁场下剪切模量增加了 1300%。将材料引入叠层橡胶支座, 并设计了新的制造工艺, 以改善叠层 MRE 隔离器中的磁场。对这种新型高度可调 MRE 基座隔离器进行了全面的实验研究, 试验结果和随后的分析表明, 新型 MRE 基座隔离器具有显著的适应能力, 即当施加的电流从 0.0 A 切换到 3.0 A 时, 它增加高达 1479% 的剪切应力和 1630% 的刚度。这种新型 MRE 基座隔离器在将来可以实现真正的自适应基础隔离系统, 以可靠和高效的方式对抗任何类型的地震。

### 3.5 其他橡胶复合材料

Zhao<sup>[57]</sup>在天然橡胶中添加一定质量分数的滑动环(SR)材料, 并采用环氧化度 50% 的 ENR 制备 NR/ENR/SR 橡胶复合材料, 材料的结构如图 6a 所示, 图 6b 展示了 SR 在天然橡胶支座中起到的作用。对复合材料的硫化特性、力学性能、动态力学性能进行了研究, 结果显示拉

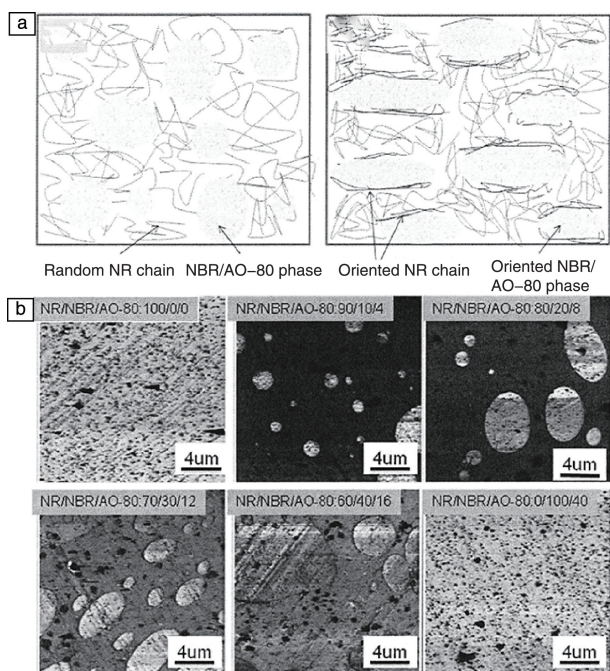


图 5 NR/NBR/AO-80 复合材料拉伸过程中的结构示意图(a), 不同配比 NR/NBR/AO-80 复合材料的 AFM 照片(b)<sup>[46]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of structure change of the NR/NBR/AO-80 composites during stretch(a), AFM images of NR/NBR/AO-80 composites with different blends ratios (b)<sup>[46]</sup>



伸强度和拉伸伸长率均符合国际标准要求, 损耗因子在标准变形和频率范围内均符合要求, 为制备高阻尼橡胶支座打下了基础。

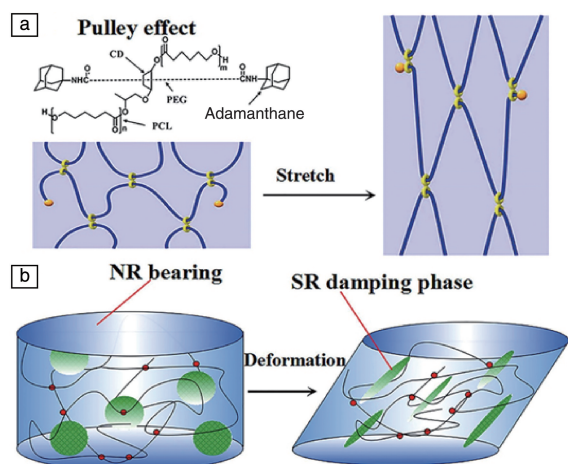


图6 滑环材料的“滑轮效应”(a)和天然橡胶/滑动环复合材料高阻尼支座的设计理念(b)<sup>[57]</sup>

Fig.6 “Pulley effect” illustration of slide-ring materials (a) and design concept of high damping natural rubber/slide-ring composites (b)<sup>[57]</sup>

Tsang 等<sup>[58]</sup>关注发展中国家建筑物隔震需求, 提出了基于橡胶-土壤混合(rubber-soil mixtures, RSM)的替代隔震方案, 围绕典型建筑物(10层、40 m宽)埋填10 m左右的RSM层, 该方案具有独特的优势。通过一系列的数值模拟和参数分析, 结果显示RSM层可以将水平和垂直的地面加速度降低60%~70%和80%~90%, 并且为降低成本, 可以使用废旧轮胎, 有效消耗世界各地废旧轮胎。但是RSM法存在着土壤共振、液化、地面沉降和橡胶污染等问题, 并不能作为隔震的有效方案, 只能是不发达区域的低成本可选方案。

## 4 结 语

由于具有独特的粘弹性, 橡胶复合材料广泛应用于建筑隔震支座。隔震支座的相关国际或国家、行业标准中, 从设计的角度出发, 对橡胶复合材料的阻尼性能、物理机械性能也提出了一系列的指标需求。然而针对这一领域需求的橡胶复合材料的设计、制备方面的研究不够系统和广泛。对隔震支座用橡胶复合材料研究, 未来应重点关注和解决以下问题: 平衡高柔性和高强度、高弹性和高阻尼, 获得综合性能优异的橡胶复合材料; 减少或不再使用铅金属, 研发多系列的新型无铅隔震支座并实现其产业化; 结合有限元等仿真手段, 研究优化隔震支座的结构。这一领域的工作, 对于研发创制新型隔震支座, 提高建筑隔震能力, 保障人民生命财产的安全

意义重大。

## 参考文献 References

- [1] Xiu J. *Tectonophysics*[J], 1992, 209(1-4): 325-329.
- [2] Zhou F, Tan P. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* [J], 2018, 17(1): 19-27.
- [3] Zhou Fulin(周福霖). *City and Disaster Reduction(城市与减灾)*[J], 2016, 5: 1-10.
- [4] Kelly J M. *Progress in Structural Engineering and Materials*[J], 1998, 1(3): 279-285.
- [5] Takafumi F. *Progress in Structural Engineering and Materials* [J], 1998, 1(3): 295-300.
- [6] Wam G P, Ryan K L. *Buildings*[J], 2012, 2(3): 300-325.
- [7] Browning J A. *Journal of Structural Engineering* [J], 1999, 125(10): 1208-1209.
- [8] Nishi T, Nobuo M. *Chinese Journal of Polymer Science*[J], 2013, 31(1): 50-57.
- [9] Wang Wenbin(王文斌), Zhao Xiaoxia(赵小霞), Chen Yuyuan(陈玉元). *Inland Earthquake(内陆地震)*[J], 2006, 20(2): 172-177.
- [10] Liu Jinqiang(刘金强), Nie Shibo(聂世波), Wang Xiaobing(王小兵). *Low Temperature Architecture Technology(低温建筑技术)*[J], 2016, 38(2): 96-98.
- [11] Shang Shouping(尚守平), Cui Xianglong(崔向龙). *Journal of Guangxi University(Natural Science Edition)(广西大学学报(自然科学版))*[J], 2016, 41(1): 21-28.
- [12] Sonawane Y N, Patil M N. *International Journal of New Innovations in Engineering and Technology*[J], 2018, 423: 1-17.
- [13] Jiang Jimu(蒋继穆). *Energy Saving of Nonferrous Metallurgy(有色冶金节能)*[J], 2013, 29(3): 4-8.
- [14] Markou A A, Oliveto N D, Athanasiou A. Modeling of High Damping Rubber Bearings. [M]//Sextos A G, Manolis G D. *Dynamic Response of Infrastructure to Environmentally Induced Loads*. 2017: 115-138.
- [15] Chen H, Pan P, Liu J, et al. *Advanced Materials Research* [J], 2014, 919-921: 348-354.
- [16] Moon B Y, Kang G J, Kang B S, et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2002, 130-131(02): 145-150.
- [17] Xue Suduo(薛素铎), Li Xiongyan(李雄彦), Cai Yancheng(蔡炎城). *Journal of Beijing University of Technology(北京工业大学学报)* [J], 2009, 2: 30-35.
- [18] Zayas V A, Low S S, Mokha A, et al. *The FPS Earthquake Resisting System Experimental Report* [R]. Earthquake Engineering Research Center, 1987.
- [19] Harvey P S, Kelly K C. *Engineering Structures* [J], 2016, 125: 521-531.
- [20] Yang Ligu(杨利国), Song Yanqing(宋艳清). *Journal of Yellow River Conservancy Technical Institute(黄河水利职业技术学院学报)* [J], 2017, 29(2): 36-39.
- [21] Shen Chaoyong(沈朝勇), Zhou Fulin(周福霖), Cui Jie(崔杰), et al. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics(地震工程与*



- 工程振动)[J], 2012, 32(6): 95-103.
- [22] Jiang Chunhuan(姜春环). *Dissertation for Master* (硕士论文)[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [23] GB/T 20688.3-2006. *Rubber Bearings—Part 3: Protection Isolators for Buildings*(橡胶支座 第 3 部分: 建筑隔震橡胶支座)[S]. 2006.
- [24] Zhao Lujie(赵录杰), Yu Miao(余 森), Qi Song(綦 松), et al. 高阻尼橡胶隔震支座的研究[C]// *Proceedings of 13th National Conference of Rheology* (第十三届全国流变学学术会议论文集) Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2016.
- [25] Hu Hao(胡 浩). *Rubber Science and Technology* (橡胶科技)[J], 2016, 14(10): 50.
- [26] Wang Gangpeng(王刚鹏). *Dissertation for Master* (硕士论文)[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [27] Shen Xiaojun(沈小俊), Chen Bokui(陈伯奎), Gao Fei(高 飞), et al. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)* (重庆交通大学学报(自然科学版))[J], 2013, 32(3): 396-399.
- [28] Zhang Yannian(张延年), Shan Chunhong(单春红), Zheng Yi(郑 怡), et al. *Advanced Engineering Sciences* (工程科学与技术)[J], 2012, 44(6): 43-49.
- [29] Huazhong University of Science and Technology(华中科技大学). China, 201210331268. 4[P]. 2013-01-09.
- [30] Guo Datong(郭大通), Yue Yao(岳 耀), Yang Shoushen(杨守申), et al. *China Rubber Industry* (橡胶工业)[J], 2017, 64(12): 744-748.
- [31] Zhang Hongsheng(张宏生), Sun Shaohui(孙少辉), Zhang Kai(张 凯), et al. *China Synthetic Rubber Industry* (合成橡胶工业)[J], 2017, 40(1): 38-42.
- [32] Zhong Shu(钟 枢), Zhang Jinbin(张靖斌). *China Rubber* (中国橡胶)[J], 2007, 23(13): 34-36.
- [33] Zhang Baosheng(张保生), Li Bin(李 斌). *Rubber Science and Technology* (橡胶科技)[J], 2017, 15(11): 22-25.
- [34] Qin R, Huang R, Lu X. *Materials & Design* [J], 2018, 149: 43-50.
- [35] Niu Kaijing(牛凯晶). *Dissertation for Master* (硕士论文)[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [36] Wu Jieyi(吴结义), Li Xiaoxiao(李晓晓), Wu Mingsheng(吴明生). *China Rubber Industry* (橡胶工业)[J], 2016, 63(7): 417-420.
- [37] Zeng Lingzi(曾令子), Zhang Fei(张 飞), Jiang Kaifeng(蒋凯峰), et al. China, 102675705 9[P]. 2013-11-20.
- [38] He Lijun(何利军), Zhao Yunfeng(赵云峰), Zhan Maosheng(詹茂盛), et al. *Aerospace Materials & Technology* (宇航材料工艺)[J], 2007, 37(3): 9-12.
- [39] Zhao X, Xiang P, Tian M, et al. *Polymer* [J], 2007, 48(20): 6056-6063.
- [40] Zhao X, Yang J, Zhao D, et al. *International Journal of Smart & Nano* [J], 2015, 6(4): 239-250.
- [41] Zhao Xiuying(赵秀英), Song Hongsong(宋洪松), Tian Bin(田 斌), et al. *Acta Materiae Compositae Sinica* (复合材料学报)[J], 2010, 27(6): 26-31.
- [42] Zhao Xiuying(赵秀英), Xiang Ping(向 平), Cao Yajun(曹亚君), et al. *China Rubber Industry* (橡胶工业)[J], 2011, 58(3): 156-159.
- [43] Xiang Ping(向 平), Zhao Xiuying(赵秀英), Zhang Liquan(张立群). *China Synthetic Rubber Industry* (合成橡胶工业)[J], 2007, 30(3): 219-223.
- [44] Xiang Ping(向 平), Xiao Daling(肖大玲), Zhao Xiuying(赵秀英), et al. *Acta Materiae Compositae Sinica* (复合材料学报)[J], 2007, 24(6): 44-49.
- [45] Zhang Geng(张 耿). *Dissertation for Master* (硕士论文)[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [46] Yang Jingna(杨静娜). *Dissertation for Master* (硕士论文)[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [47] Zhang Kai(张 凯), Yue Yao(岳 耀), Zhang Hongsheng(张宏生), et al. *China Rubber Industry* (橡胶工业)[J], 2018, 65(4): 365-369.
- [48] Song Hongsong(宋洪松), Xiang Ping(向 平), Zhao Xiuying(赵秀英), et al. *China Rubber Industry* (橡胶工业)[J], 2010, 57(8): 471-475.
- [49] Song Hongsong(宋洪松), Li Jing(李 静), Cao Yajun(曹亚君), et al. *China Synthetic Rubber Industry* (合成橡胶工业)[J], 2011, 34(1): 59-63.
- [50] Zhao Xiuying(赵秀英), Li Jing(李 静), Song Hongsong(宋洪松), et al. *China Synthetic Rubber Industry* (合成橡胶工业)[J], 2010, 33(3): 217-220.
- [51] Vicente J D, Klingenberg D J, Hidalgoalvarez R. *Soft Matter* [J], 2011, 7(8): 3701-3710.
- [52] Chen L, Gong X, Jiang W, et al. *Journal of Materials Science* [J], 2007, 42(14): 5483-5489.
- [53] Lokander M, Stenberg B. *Polymer* [J], 2003, 22(3): 245-251.
- [54] Li Y, Li J, Li W, et al. *Smart Materials & Structures* [J], 2013, 22(3): 36-46.
- [55] Tian Y, Liu Y, He M, et al. *Materials Research Bulletin* [J], 2013, 48(5): 2002-2005.
- [56] Li Y, Li J, Tian T, et al. *Smart Materials & Structures* [J], 2013, 22(9): 095020.
- [57] Wang W Zhao D, Yang J, et al. *Scientific Reports* [J], 2016, 6: 22810.
- [58] Tsang H H. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* [J], 2010, 37(2): 283-303.