

橡胶阻尼材料的研究进展

黄光速*, 吴锦荣, 郑 静

(四川大学高分子科学与工程学院, 高分子材料工程国家重点实验室, 成都 610065)

摘要: 阻尼材料, 特别是橡胶阻尼材料, 作为一种减振降噪, 改善人机工作环境和设计制造水平的特殊功能材料, 在高铁快轨、航空航天、海军舰船、机械工程和国家安全等诸多领域都得到了广泛的应用。然而随着社会文明程度和设计制造水平的提高及高新技术的迅速发展, 对橡胶阻尼材料的要求越来越高, 使新型高性能橡胶阻尼材料成为竞相研发的材料之一。本文将从橡胶基体的选择、分子结构和微观结构的设计、特殊阻尼机制的构筑等方面介绍橡胶阻尼材料的最新研究进展。

关键词: 阻尼材料; 橡胶; 研究进展

引言

21 世纪, 社会各个领域都逐步实现了机械化和自动化, 但随之带来的振动和噪声充斥于社会生活和生产环境的方方面面。振动和噪声一方面污染环境, 严重伤害人类的身心健康, 降低社会文明程度; 另一方面使机械设备的精度、稳定性和可靠性大大降低, 产生疲劳破坏; 在高新技术和国防科技领域甚至降低设计和制造水平, 成为技术瓶颈。橡胶由于具有特殊的粘弹性能, 一直是减振降噪的主体材料^[1]。然而, 单一的橡胶组分往往由于阻尼因子低、阻尼温域窄或有效温域不在阻尼功能区域, 导致减振降噪效果较差, 需要进行性能改进^[2, 3]。改性传统橡胶阻尼材料的方法主要有共混、共聚和互穿聚合物网络等, 近年来采用化学或物理的方法设计橡胶分子结构和微观结构, 或构筑特殊阻尼机制逐渐引起人们的重视, 并取得了良好的效果。本文将从橡胶基体的选择、分子结构和微观结构的设计、特殊阻尼机制的构筑等方面介绍橡胶阻尼材料的最新研究进展。

1 高阻尼橡胶基体的选择

长期以来人们对阻尼材料橡胶基体的选择大多依赖于经验, 理论指导不强。美国里海大学 L. H. Sperling 教授领导的研究小组^[4]发现, 在玻璃化转变区附近, 损耗模量对温度的积分 LA, 由聚合物的化学结构决定。即假设大分子重复单元中的结构单元(包括分子主链和直接连在主链上的侧基)的在单位重量中的摩尔损耗常数对材料总损耗面积提供一个加合性的贡献。由此提出了基团贡献分析法, 即:

$$LA = \sum_{i=1}^n \frac{LA_i M_i}{m} = \sum_{i=1}^n \frac{G_i}{M_i}$$

吴锦荣等^[4]发现无定形聚合物的脆性指数 (fragility index, m) 可以用来评价聚合物的阻尼性能优劣。脆性指数的概念最早由 Angell 提出^[5], 用于评价无定形液体在玻璃化转变处弛豫过程的快慢, 其定义为:

$$m = \left[\frac{d \log \eta}{d(T_g/T)} \right]_{T=T_g} \quad \text{或} \quad m = \left[\frac{d \log \tau}{d(T_g/T)} \right]_{T=T_g} \quad (1)$$

式中 η 和 τ 分别为粘度和弛豫时间, T_g 为玻璃化转变温度。如图 1 所示, 无定形聚合物的 m 值与其阻尼温域宽度 (W) 和损耗峰积分面积 (A) 有着定量的关系, 其关系式分别 $W \approx 17.35 \times m^{-1.18}$, $A \approx 18.75 \times m^{-1.24}$ 。因此, 无定形聚合物随着 m 值的降低, W 和 A 值增加, 阻尼性能提高, 聚异丁烯 (PIB) 和丁基橡胶 (IIR) 具有

收稿: 2013-07-15; 修回: 2013-12-03;

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50873070);

作者简介: 黄光速, 教授, 主要研究方向为橡胶凝聚态物理、橡胶的高性能化和功能化;

* 通讯联系人, E-mail: huangguangsu@scu.edu.cn.

最小的脆性指数, W 和 A 值最大^[4]。这一发现对于高阻尼橡胶基体的选择具有一定的指导意义。

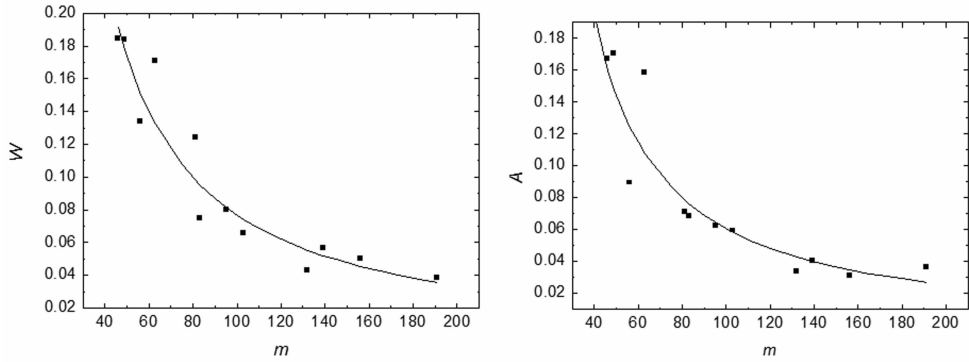


图 1 无定形聚合物的脆性指数(m)与其阻尼温域宽度(W)和损耗峰积分面积(A)的关系图 (W 和 A 的数据拟合为 $W \approx 17.35(\pm 0.49) \times m^{-1.18(\pm 0.14)}$ and $A \approx 18.75(\pm 0.91) \times m^{-1.24(\pm 0.19)}$ 。

聚合物脆性顺序由小到大为:聚异丁烯、氯化丁基橡胶、聚甲基丙烯酸丁酯、交联氯化丁基橡胶、聚醋酸乙酯、聚甲基丙烯酸乙酯、聚丙烯酸乙酯、聚甲基丙烯酸甲酯、聚碳酸酯、聚苯乙烯、聚酯、聚氯乙烯

Figure 1 The fragility dependence of transition wideness of storage modulus (W) and integration area of $\tan\delta$ (A). The W and A data were fitted with $W \approx 17.35(\pm 0.49) \times m^{-1.18(\pm 0.14)}$ and $A \approx 18.75(\pm 0.91) \times m^{-1.24(\pm 0.19)}$, respectively. Polymers are listed in ascending fragility order: PIB, CIIR, PBMA, C-CIIR, PVAc, PEMA, PEA, PMMA, PC, PSt, PET, PVC^[4]

2 高阻尼橡胶的分子设计

根据基团贡献分析法,引入体积大、数量多、极性大的不同侧链基团,可以提高橡胶的阻尼性能的原理,黄光速^[6~8]通过分子设计将对二苯基和单苯基有机硅单体引入硅橡胶分子链,显著地提高了硅橡胶的阻尼性能,在 $-75 \sim 180^\circ\text{C}$ 的温度范围内其阻尼因子值($\tan\delta$)可以达到 0.3 以上,突破了硅橡胶阻尼因子低的技术瓶颈。最近研究表明,悬垂链结构也能极大地提高橡胶的阻尼性能。Urayama 等^[9]采用三官能度固化剂交联单官能团端基和双官能团端基的聚二甲基硅氧烷(PDMS),或采用三官能度固化剂以不等当量的比例交联双官能团端基的 PDMS,制备了具有大量悬垂链结构的 PDMS 无规网络(如图 2 所示),其 $\tan\delta$ 在 -30°C 到 150°C 的温度区间内大于 0.3,而且不随温度变化而变化。该课题组还将窄分子量分布的单丙烯酰基封端的丙烯酸丁酯预聚物与双丙烯酰基封端的丙烯酸丁酯预聚物共聚,制备了具有大量悬垂链的聚丙烯酸丁酯(PBA)弹性体,并发现悬垂链的分子运动产生了一个新的阻尼峰,极大地拓宽 PBA 的阻尼功能区,如图 3 所示^[10]。梳型和支化的聚合物具有大量的悬垂链和自由活动端基,分子运动具有多重性,亦具有较高的阻尼性能。Lee 等^[11]研究了梳型聚异戊二烯橡胶的阻尼性能,发现支化链在动态应力作用下的拉伸和收缩运动能够贡献额外阻尼性能。郝名扬等^[12]以甲苯-2, 4-二异氰酸酯(TDI)和二乙醇胺(DEOA)为原料,采用一步法合成了超支化聚氨酯,并以其为预聚物制备阻尼涂层,该涂层的 $\tan\delta$ 最大值($\tan\delta_{\max}$)达 1, $\tan\delta \geq 0.5$ 的温度范围大于 50°C 。这些研究工作为新型高阻尼橡胶的分子设计提供了新思路。

3 高阻尼橡胶的微观结构设计

由单一橡胶成分组成的阻尼材料的阻尼功能区较窄,往往不能满足实际应用需要,因此需要采用其它聚合物对橡胶进行改性。改性过程中,调控多组分体系的相态结构尤为重要。若体系各组分相容性好,形成均一相,损耗因子只出现单阻尼峰,有效阻尼功能区窄;而各组分相容性差,则相分离程度大,损耗因子出现双阻尼峰,且在两峰之间的温度范围内出现峰谷。因此,在多组分橡胶材料中,各组分应有一定程度的相分离,同时又具有一定的相容性,在界面间形成适当的过渡层,使得各组分在出现各自阻尼峰的同时,阻尼峰之间的损耗因子也较高^[13]。

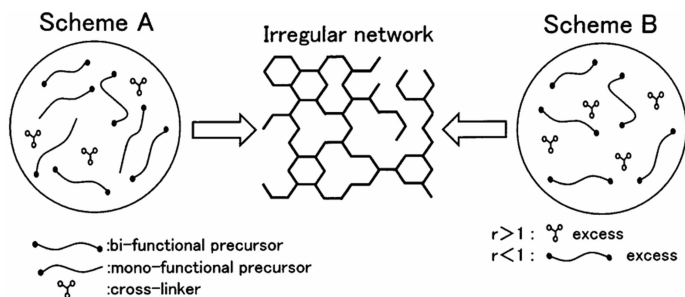
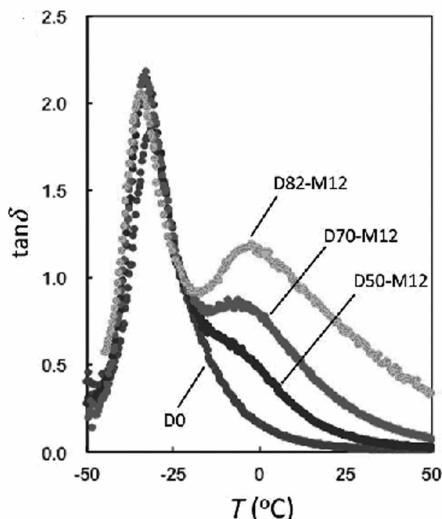


图 2 制备无规网络的示意图

Figure 2 Schematic presentation for preparing the irregular networks^[9]图 3 不同含量悬垂链的弹性体在 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}^{-1}$ 升温速率 5s^{-1} 角频率时的阻尼损耗峰与温度关系图Figure 3 Temperature dependence of $\tan \delta$ obtained with a heating rate of $5^{\circ}\text{C}/\text{min}^{-1}$ and an angular frequency of 5s^{-1} for the elastomers with various contents of dangling chains^[10]

两种或两种以上聚合物的单体进行共聚合是调控多组分橡胶体系相态结构和阻尼性能的有效方法。Chu 等^[14]通过光催化的方法制备醋酸乙烯酯和丙烯酸丁酯的共聚物,共聚物中两组分产生相分离,但仍有一定相容性,因此,阻尼功能区宽, $\tan \delta_{\text{max}}$ 值高。朱金华等^[15]通过接枝和嵌段共聚合成了软段类型不同,软段与硬段产生相分离,又有一定相容性的聚氨酯,其 $\tan \delta_{\text{max}}$ 值达到 0.8, 且阻尼功能区的温度范围为 $-48 \sim 120^{\circ}\text{C}$, 跨度超过 160°C 。Larock 等^[16, 17]采用三氟化硼二乙醚及其衍生物为阳离子引发剂,引发大豆油(包括普通大豆油、低不饱和度大豆油和共轭大豆油)与苯乙烯、二乙烯基苯、降冰片二烯、双环戊基二烯等单体共聚合,通过调整单体比例,可以制成弹性体或塑料,具有较高的阻尼性能。他们还发现改变大豆油的种类、乙烯基单体种类、化学当量比、引发剂用量和种类,可以使共聚物的阻尼功能区的温度范围达 110°C 。

共混改性要求各组分的 T_g 相差不大,或部分相容,这时各组分的阻尼功能区相互交叠或相互靠近,形成更宽的阻尼功能区。黄光速等^[18~21]采用低分子量丙烯酸酯齐聚物、聚(甲基)丙烯酸酯和氯化聚乙烯与氯化丁基橡胶(CIIR)共混,把 CIIR 的优异阻尼性能拓宽到室温以上,制备了在 125Hz 下, $\tan \delta_{\text{max}}$ 值达 $1.4 \sim 1.83$, $\tan \delta \geq 0.7$ 的有效阻尼功能区达 $-25 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 的高性能阻尼材料(如图 4 所示)。他们通过正电子湮没研究发现,添加增塑剂和低分子量齐聚物可以增加 CIIR 的自由体积孔洞密度,有利于更多分子链参与运动,提高 CIIR 的阻尼性能^[22, 23]。橡胶与塑料共混是制备聚合物基阻尼材料最常见的方法。赵树高等^[24]发现聚氯乙烯(PVC)和氯化聚氯乙烯(CPVC)与乙烯-醋酸乙烯酯橡胶(EVM)和丁腈橡胶(NBR)具有一定的相容性,能显著拓宽 EVM/NBR 共混物的阻尼功能区。NBR 与 PVC 共混是目前工

程应用中重要橡胶阻尼材料之一,通过调整配方,可制备 $\tan\delta_{\max} > 1$, $\tan\delta_{\max}$ 位于室温的 NBR/PVC 减震材料^[25]。目前,橡塑共混的主要问题在于橡胶与塑料共混虽然能有效拓宽共混物阻尼功能区,却难以提高 $\tan\delta$ 值。

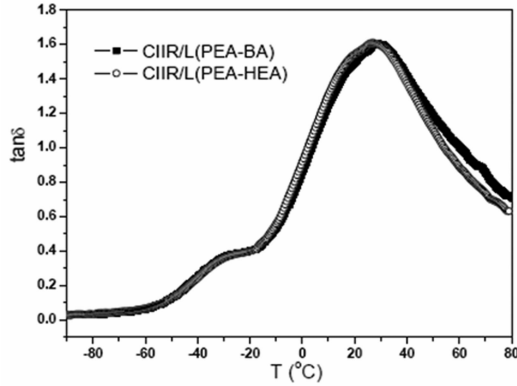


图 4 低分子量聚丙烯酸酯和氯化丁基橡胶共混物的阻尼因子图

Figure 4 The loss tangent of the blends of low molecular weight polyacrylates and CIIR (125Hz)

互穿网络(IPN)结构是由两种或多种性质不同的聚合物网络间通过物理互锁而形成的一种交织网络结构,该类聚合物材料具有强迫互容、界面互穿、双相连续、协同作用等独特的结构与性能特征,可以使不相容或半相容的聚合物组分通过 IPN 方式结合起来,得到阻尼功能区宽、阻尼峰高的阻尼材料。黄光速等^[26,27]采用同步互贯聚合物网络等技术制备聚苯基硅氧烷(PMPS)/聚甲基丙烯酸酯(PMAc)IPN 阻尼材料,发现由相容性好的组分制备的 IPN 材料阻尼值最高, $\tan\delta_{\max}$ 可达 1.4, 只有一个玻璃化温度转变峰,其微相结构为双相连续;组分介于相容与不相容之间时,所构成的 IPN 的 $\tan\delta \geq 0.3$ 的温度区间最宽,可达 170°C,微相结构为单相连续;由相容性差的组分制得阻尼材料的内耗峰裂分为两个区间。之后,他们又以 CIIR 和 PMAc 为基体制备了 IPN 阻尼材料,材料中相畴尺寸在 100~200nm 之间,两组分之间具有较好的相容性;调节组分比例可形成阻尼平台区,10 Hz 下, $\tan\delta > 0.7$ 的有效阻尼功能区可从 -50 持续至 60°C,同时 $\tan\delta_{\max}$ 可达 1.4^[28]。Suresh 等^[29]采用种子乳液聚合法制备以聚丙烯酸丁酯(PBA)为核,以聚甲基丙烯酸丁酯(PBMA)为壳的乳液,成膜后获得 PBA/PBMA 半互贯 IPN;研究表明,PBA 种子交联密度越低,相分离程度越大,IPN 的阻尼性能越好;相反,PBA 种子交联密度越大,核壳之间的相容性增大,IPN 的阻尼性能下降。然而,在天然橡胶(NR)/聚苯乙烯(PS)IPN 中,相分离的影响却与 PBA/PBMA 体系不同。在 NR/PS 体系中,PS 含量低于 12%时,IPN 中为单相结构,其阻尼功能区较宽,而 PS 含量高于 12%时,出现明显相分离,产生两个独立的 $\tan\delta$ 峰,反而不利于阻尼性能的提高。以上研究结果说明在 IPN 体系中,需根据各组分的 T_g 和相容性等因素调节相态结构,进而调控 IPN 的阻尼性能。

4 高阻尼橡胶的特殊阻尼机制

4.1 界面摩擦阻尼机制

纳米填料粒径小,比表面积大,与聚合物复合能产生大量的界面。Suhr 等^[30]在高填充多壁碳纳米(MWCNT)复合材料中,发现 MWCNT 与聚合物基体之间的界面作用较弱时,MWCNT 和聚合物之间以及 MWCNT 和 MWCNT 之间在外界动态力场作用下会发生“粘结-滑移”过程,导致产生界面摩擦,使复合材料的阻尼性能提高 1400%。之后,该课题组采用化学气相沉积法制备了长度约为 3.5mm 平行排列的 MWCNT 束,采用液体 PDMS 预聚体浸渍 MWCNT 束并固化成型,制备了连续 MWCNT 增强的 PDMS,测试表明沿着 MWCNT 排列方向,复合材料的阻尼性能提高了 2100%(如图 5 所示),这是由于在变形过程中界面摩擦将机械能转化为热能,热能又在连续的 MWCNT 网络中被及时传导出去^[31]。Zhou 和 Rajoria 等^[32,33]发现单壁碳纳米管(SWCNT)也能显著地提高复合材料的阻尼性能。应变对碳

纳米管(CNT)与聚合物基体的界面摩擦阻尼有重要的影响,当应变较小时,CNT与聚合物基体处于“粘结”状态,聚合物基体的粘弹阻尼起主要作用,当应变超过一临界值时,CNT开始“滑移”,这时界面摩擦开始起作用,随着应变的增加,界面摩擦升高^[34~36]。温度对界面摩擦产生的阻尼也有较大的影响,温度越高,聚合物基体分子链越容易运动,“粘结-滑移”转变的临界应变越小,复合材料的阻尼值越高^[34~36]。CNT/聚合物复合材料阻尼性能随着应变和温度增加而变大的特性,与传统粘弹阻尼机制在某一温度和应变下有一最大值相比,有明显的优势,可用于一些温度高、应变大的减振环境中。进一步研究发现CNT的种类、表面改性、含量、组装方式、聚合物基体性质等对复合材料的“粘结-滑移”机制都有较大的影响,例如,增加CNT长径比,改善其分散效果都可以明显提高复合材料的界面摩擦阻尼^[32, 33, 35, 37, 38]。因此,改变这些因素可以用来调控复合材料的阻尼性能。除了CNT外,研究者还发现纳米蒙脱土、氧化石墨烯、ZnO纳米棒、碳纤维等填料与聚合物复合时,也能产生界面摩擦阻尼^[39~41]。因此,纳米填料用于提高复合材料的阻尼性能有较大的发展潜力。

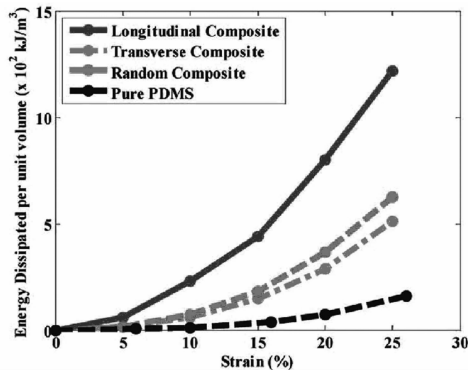


图5 在0~25%应变的压缩循环中聚合物单位体积耗散的能量图

Figure 5 Dissipated energy per unit volume is calculated and compared during compressive cycles at different strain levels between 0 and 25%^[30]

4.2 可逆氢键作用阻尼机制

吴驰飞等^[42~53]提出当有机小分子与高聚物基体间可以形成可逆氢键作用时,在外界振动作用下,小分子与聚合物之间某些氢键断裂或减弱,同时又可以生成新的氢键,由此将振动能转变为热能,产生阻尼效应。根据这个原理,他们采用受阻酚AO-80和次磺酰胺类硫化促进剂DZ与氯化聚乙烯(CPE)、丙烯酸酯橡胶(ACR)、氯化聚丙烯(CPP)、CIIR、丁腈橡胶(NBR)、氢化丁腈橡胶(HNBR)等聚合物基体共混,成功制备了一系列阻尼值高、阻尼功能区宽的高性能阻尼材料。最近,吴丝竹等^[54]结合实验和分子模拟的方法进一步说明了受阻酚提高橡胶基体阻尼性能的机理。他们采用FTIR、NMR证实了AO-80与NBR分子之间的氢键作用,同时正电子湮没寿命谱测试和分子动力学模拟表明NBR/AO80共混比例为100/60时,共混物中氢键数量最多,氢键结合能最大,导致共混物的自由体积最小,阻尼值最高。

4.3 压电转换阻尼机制

当声波或振动能等传递到压电陶瓷材料(PZT)上,由压电效应转化为电能,将在材料内部产生交流电压。当材料内部电阻太大(相当于断路)或电阻太小(相当于短路)时,产生的电能未消失,会再次转化为振动能,反复这种过程,振动衰减会持续一段时间。而当PZT分散在聚合物基体中,聚合物基体又具有适宜的电阻和导电性能时,电能将转变为热能并迅速耗散,振动得到及时衰减。若复合材料内部电阻为 R ,压电陶瓷的电容量为 C ,衰减振动频率为 ω ,这时阻抗的匹配条件 $R=1/\omega C$,压电复合材料对振动的衰减最快。黄光速等^[55, 56]采用CIIR/ACM共混物为基体,乙炔碳黑为导电填料,制备了压电陶瓷复合材料。研究表明,当材料电阻率在 $10^5 \Omega \cdot \text{cm} \sim 109.5 \Omega \cdot \text{cm}$,且压电陶瓷含量在30vol%~40vol%时,该复合材料具有优良的阻尼减振性能。最近,该课题组还采用硅橡胶为基体,石墨烯、CNT和碳黑为导电填料,PZT和表面包覆聚苯胺的PZT为压电功能填料,制备了阻尼性能较好的硅橡胶纳米复合的压电阻尼材料。发现PZT表面包覆导电聚合物,采用石墨烯或CNT代替碳黑,增加测试应变等因素均有

利于复合材料阻尼性能的提高^[57]。王雁冰等^[58]制备了PZT/NBR阻尼材料,发现当PZT用量为200份时,复合材料的拉伸性能和阻尼性能较好,极化可提高复合材料的阻尼性能,在测试时施加交变应力越大,复合材料阻尼性能越高。曹建莉^[59]系统研究了压电陶瓷用量、种类、制备工艺、极化条件、硫化配方及其工艺等对压电性能的影响,制备了阻尼性能较好的PZT/NBR复合材料,水下吸声实验表明该材料有较大的吸声系数。由于压电复合材料的减振机理基于机械能→电能→热能的转换,故机械能越大,衰减能力越强,具有智能效应,不依赖于温度,具有传统聚合物的粘弹阻尼无可比拟的优越性,应用范围更广。

4.4 磁流变阻尼机制

磁流变液一般是由固体微米级磁性颗粒分散溶于液体介质中制成的非胶体悬浮液。磁流变液在阻尼减振中的运用最早是在磁流变阻尼器上实现的^[60]。磁流变阻尼器在毫秒级内能实现自由流动的粘滞流体和半固体之间的可逆变化,具有动态范围宽、构造简单、响应快、阻尼力大、屈服强度可任意控制且连续顺逆可调等优良性能。但是颗粒易沉降和磨损、稳定性差等问题一定程度上限制了磁流变阻尼器在实际中的应用。为了克服这个缺点,近年来,一些学者使用固态橡胶代替液体作为载质,制备了磁流变弹性体(MRE)^[61]。MRE按其结构可以分为各向同性磁流变弹性体和各向异性磁流变弹性体,其中各向异性磁流变弹性体具有更高的磁流变效应和磁致模量变化。由于硅橡胶的预聚体是液体,磁性颗粒在其中容易均匀分散,在磁场下固化时,磁性颗粒容易磁化排列成链状结构,而且硅橡胶模量低,制备出的复合材料磁流变效应高,因此,初期的MRE大都采用硅橡胶作为基体^[62~64]。例如,Chertovich等^[63]在硅橡胶基体中添加两种不同粒径的铁粉颗粒,并在硫化过程中施加2.4GHz的电磁场,制得的MRE在低应变下磁流变效应高,阻尼值最大可以提高两倍。以硅橡胶为基体的MRE虽然磁流变效应高,但其力学性能较差,不能满足工程应用。因此,龚兴龙、Kallio、夏和生等课题组^[65~77]分别采用NR、CIIR、聚丁二烯(PB)、聚氨酯橡胶(TPU)等为基体,在外电场作用下与羰基铁粉复合,制备了多种MRE,并系统研究了基体性质、铁磁性颗粒含量和表面修饰、增塑剂含量、磁场大小、测试频率和应变等因素对MRE阻尼性能的影响,为MRE的研究和实际应用奠定了基础。近年来,热塑性弹性体作为基体的MRE也引起了研究者的兴趣^[78~81]。例如,Lu等^[81]以SEBS为基体,与羰基铁粉复合,制备了羰基铁粉无规分布和有序排列的MRE,研究表明,MRE中羰基铁粉有序排列有利于提高其磁流变效应。MRE由于兼有磁流变材料和弹性体的优点,又克服了磁流变液沉降、稳定性差等缺点,成为磁流变材料研究的一个新方向^[82]。但目前研制出的MRE存在磁流变效应和机械性能上的矛盾,难以在既需要高强度又需要变刚度器件中实际应用,需要进一步改进。

5 结语

橡胶阻尼材料在众多领域中已经获得成功应用。但高新技术和苛刻应用条件的需求,对阻尼材料提出了日益高标准的挑战,如在要求高损耗因子、阻尼性能对温度和频率依赖性小的同时,要求服役寿命长、智能化、具有高力学性能或结构功能一体化等成为阻尼材料发展的趋势。目前,围绕以上目标进行的研究主要可以概括为橡胶及其复合材料的多层次结构设计。橡胶基体的阻尼性能受到使用温度和振动频率的影响很大,通过合成方法设计新型分子结构,引入悬垂链、自由端基、无规网络等多重松弛过程,可以有效提高橡胶基体的阻尼值并拓宽其阻尼功能区。对于多组分体系,根据各组分 T_g 和相容性等因素,采用化学或物理的方法调控其微观相态结构,可达到各组分之间取长补短的目的。为了减小传统橡胶阻尼材料阻尼功能对温度频率的依赖性,通过构筑新的阻尼机制如引入界面摩擦阻尼、可逆氢键作用、压电转换、磁流变等对提高橡胶阻尼材料的阻尼性能有显著的效果,是今后阻尼橡胶的一个重要的发展方向。但目前这些阻尼材料仍存在问题亟待解决:例如,为增加界面摩擦阻尼而引入太多纳米填料可能损坏复合材料的力学性能;受阻酚与橡胶复合体系的阻尼性能因为使用时间延长相分离增加可能导致阻尼性能下降;压电转换、磁流变等阻尼机制在橡胶基体中的效果尚不尽人意;高阻尼和材料升温,动态疲劳及力学性能之间始终存在矛盾,解决这些问题或许是更具挑战性的工作。

参考文献:

- [1] 涂春潮,周文英,米志安,苏正涛. 合成橡胶工业,2006,29(5):388~391.
- [2] 肖大玲,刘俊杰,赵秀英,张立群. 橡胶工业,2010,57(2):121~127.
- [3] 王晏研,陈喜荣,黄光速. 材料导报,2004,18(10):54~56.
- [4] Wu JR, Huang GS, Qu LL, Zheng J. *J Non-Cryst Solids*,2009,355(34-36):1755~1759.
- [5] Angell CA. *J Non-Cryst Solids*,1985,73(1-3):1~17.
- [6] 唐振华,谢志坚,曲亮靓,黄光速. 橡胶工业,2007,54(10):610~612.
- [7] 王强,黄光速,于连江,谢志坚. 世界橡胶工业,2008,35(6):20~23.
- [8] 黄光速,郑静,叶林铭,谢志坚. 中国发明专利,201110007697.1,2011.
- [9] Urayama K, Miki T, Takigawa T, Kohjiya S. *Chem Mater*,2004,16(1):173~178.
- [10] Yamazaki H, Takeda M, Kohno Y, Ando H, Urayama K. *Macromolecules*,2011,44:8829~8834.
- [11] Lee JH, Driva P, Hadjichristidis N, Wright PJ, Rucker SP, Lohse DJ. *Macromolecules*,2009,42:1392~1399.
- [12] 郝名扬,梁红波,管静,陈雅铭,熊磊,钟卫. 高等学校化学学报,2009,30(1):215~220.
- [13] 王如义,郑元锁. 橡胶工业,2003,50(2):88~93.
- [14] Chu HH, Lee, CM, Huang WG. *J Appl Polym Sci*,2004,91(3):396~1403.
- [15] 朱金华,文庆珍,姚树人. 应用化学,2001,18(5):416~418.
- [16] Li F, Laroc RC. *Polym Advan Technol*,2002,13(6):436~449.
- [17] Andjelkovic DD, Lu Y, Kessler MR, Larock RC. *Macromol Mater Eng*,2009,294(8):472~483.
- [18] 黄光速,吴锦荣,潘启英,曲亮靓,刘志远. 中国发明专利,200610020403.8,2006.
- [19] 黄光速,吴锦荣,陈喜荣,何显儒. 中国发明专利,200510020175.X,2005.
- [20] 黄光速,潘启英,吴锦荣,郑静,唐振华. 中国发明专利,200610020404.2,2006.
- [21] 何显儒,黄光速,周洪,江璐霞,赵小东,张俊,王建华. 高分子学报,2005(1):108~112.
- [22] Wu JR, Huang GS, Wang XA, He XJ, Xu B. *Macromolecules*,2012,DOI:10.1021/ma3001274.
- [23] Qu LL, Huang GS, Wu JR, Tang ZH. *J Mater Sci*,2007,42(17):7256~7262.
- [24] Shi XY, Weina B, Shugao Z. *J Appl Polym Sci*,2011,120(2):1121~1125.
- [25] Senake PMC, Ishiaku US, Mohd IZA. *Eur Polym J*,2001,37(1):167~178.
- [26] 李强,黄光速,江璐霞. 高分子学报,2003(3):409~413.
- [27] Huang GS, Li Q, Jiang LX. *J Appl Polym Sci*,2002,85(3):545~551.
- [28] Huang GS, He XR, Wu JR, Pan QY, Zheng J, Zhou H. *J Appl Polym Sci*,2006,102:3127~3133.
- [29] Suresh KI, Vishwainatham S, Bartsch E. *Polym. Adv. Technol*.2007,18(5):364~372.
- [30] Suhr J, Koratkar N, Keblinski P, Ajayan P. *Nat Mater*.2005,4(2):134~137.
- [31] Ci L, Suhr J, Pushparaj V, Zhang X, Ajayan PM. *Nano Lett*.2008,8(9):2762~2766.
- [32] Zhou X, Shin E, Wang KW, Bakis CE. *Compos Sci Technol*,2004,64(15):2425~2437.
- [33] Rajoria H, Jalili N. *Compos Sci Technol*,2005,65(14):2079~2093.
- [34] Suhr J, Zhang W, Ajayan PM, Koratkar NA. *Nano Lett*.2006,6(2):219~223.
- [35] Suhr J, Koratkar NA. *J Mater Sci*,2008,43(13):4370~4382.
- [36] Gong Z, Gong J, Yan X, Gao S, Wang B. *J Phys Chem C*,2011,115(38):18468~18472.
- [37] Auad ML, Mosiewicki MA, Uzupinar C, Williams RJJ. *Compos Sci Technol*,2009,69(7-8):1088~1092.
- [38] Wang Z, Whitby RLD, Rousseau M, Nevill S, Geaves G, Mikhailovsky SV. *J Mater Chem*,2011,21:4150~4155.
- [39] Chen B, Ma N, Bai X, Zhang H, Zhang Y. *RSC Adv*.2012,2(11):4683~4689.
- [40] Chen S, Wang Q, Wang T. *Mater Chem Phys*,2011,130(1-2):680~684.
- [41] Alipour Skandani A, Masghouni N, Case SW, Leo DJ, Al-Haik M. *Appl Phys Lett*,2012,101(7):073111-073111-4.
- [42] Wu C, Yamagishi T, Nakamoto Y, Ishida S, Nitta K. *J Polym Sci Pol Phys*,2000,38(22):2943~2953.
- [43] Wu C, Yamagishi T, Nakamoto Y, Ishida S, Nitta K, Kubota S. *J Polym Sci Pol Phys*,2000,38(17):2285~2295.
- [44] Wu CF, Yamagishi TA, Nakamoto Y, Ishida SI, Kubota S, Nitta KH. *J Polym Sci Pol Phys*,2000,38(11):1496~1503.
- [45] Wu CF, Otani Y, Namiki N, Emi H, Nitta KH, Kubota S. *J Appl Polym Sci*,2001,82(7):1788~1793.
- [46] Wu CF. *Chinese J Polym Sci*,2001,19(5):455~466.
- [47] Wu CF. *J Appl Polym Sci*,2001,80(13):2468~2473.
- [48] Wu CF, Akiyama S. *Kobunshi Ronbunshu*,2002,59(1):60~62.
- [49] Tobusawa T, Wu CF, Akiyama S. *Kobunshi Ronbunshu*,2002,59(7):427~431.
- [50] Wu CF. *Chinese J Polym Sci*,2003,22(1):7~16.

- [51] Wu CF. Chinese J Polym Sci, 2003, 21(4):483~486.
- [52] Li C, Xu SA, Xiao FY, Wu CF. Eur Polym J, 2006, 42(10):2507~2514.
- [53] Cao YY, Mou HY, Shen F, Xu HY, Hu GH, Wu CF. Polym Eng Sci, 2011, 51(1):201~208.
- [54] Qiao B, Zhao X, Yue D, Zhang L, Wu S. J Mater Chem, 2012, 22 (24):12339~12348.
- [55] 王晏研,陈喜荣,黄光速,潘启英,吴锦荣. 高分子科学与工程,2005, 21(3):246~249.
- [56] Liu ZY, Wang YY, Huang GS, Wu JR. J Appl Polym Sci, 2008, 108, (6), 3670~3676.
- [57] 舒俊. 新型压电阻尼硅橡胶(硕士论文). 成都:四川大学, 2012.
- [58] 王雁冰,黄志雄,杜明,张联盟. 橡胶工业,2008, 55 (1):25~27.
- [59] 曹建莉. 新型橡胶基压电阻尼复合材料的研究(硕士论文). 北京:北京化工大学, 2007.
- [60] 赵晓文,姚凯,侯忠明,杜彦亭. 科技导报,2010, 28 (13):47~51.
- [61] 王宇飞,何琳,杨雪,帅长庚. 材料科学与工程学报,2010, 28 (4):633~637.
- [62] Shiga T, Okada A, Kurauchi T. J Appl Polym Sci,1995, 58(4):787~792.
- [63] Chertovich AV, Stepanov GV, Kramarenko EY, Khokhlov AR. Macromol Mater Eng, 2010, 295(4): 336~341.
- [64] Farshad M, Benine A. Polym Test, 2004, 23(3):347~353.
- [65] 李剑锋,龚兴龙,张先舟,张培强. 功能材料,2006, 37 (6):1003~1006.
- [66] 江万权,张复殿,陈祖耀,龚兴龙. 功能材料,2006, 37 (7):1163~1165.
- [67] 龚兴龙,李剑锋,张先舟,张培强. 功能材料,2006, 37, (5):733~735.
- [68] Deng HX, Gong XL. Commun Nonlinear Sci,2008, 13(9):1938~1947.
- [69] Chen L, Gong XL, Li WH. Chinese J Chem Phys, 2008, 21(6): 581~585.
- [70] Deng HX, Gong XL, Wang LH. Smart Mater Struct, 2006, 15(5): N111~N116.
- [71] Gong X, Fan Y, Xuan S, Xu Y, Peng C. Ind. Eng. Chem. Res. 2012, 51:6395~6403.
- [72] Fan Y, Gong X, Xuan S, Zhang W, Zheng J, Jiang W. Smart Mater Struct, 2011, 20(3): 035007.
- [73] Kallio M, Lindroos T, Aalto S, Järvinen E, Kärnä T, Meinander T. Smart Mater Struct, 2007, 16(2):506~514.
- [74] Wu J, Gong X, Fan Y, Xia H. Smart Mater Struct, 2010, 19(10):105007.
- [75] Wu J, Gong X, Fan Y, Xia H. J Appl Polym Sci, 2012, 123(4):2476~2484.
- [76] Wu J, Gong X, Fan Y, Xia H. Soft Matter, 2011, 7(13):6205~6217.
- [77] Gong Q, Wu J, Gong X, Fan Y, Xia H. RSC Advances, 2013, 3:3241~3248.
- [78] Lu X, Qiao X, Watanabe H, Gong X, Yang T, Li W, Sun K, Li M, Yang K, Xie H, Yin Q, Wang D, Chen X. Rheol Acta, 2011, 51(1):37~50.
- [79] Zając P, Kaleta J, Lewandowski D, Gasperowicz A. Smart Mater Struct, 2010, 19(4):045014.
- [80] Qiao X, Lu X, Li W, Chen J, Gong X, Yang T, Li W, Sun K, Chen X. Smart Mater Struct, 2012, 21(11):115028.
- [81] Venkateswara Rao P, Maniprakash S, Srinivasan SM, Srinivasa AR. Smart Mater Struct, 2010, 19(8):085019.
- [82] 方生,龚兴龙,张先舟,张培强. 中国科学技术大学学报,2004, 34(4):456~463.

Research Progress on Damping Rubber Materials

HUANG Guang-su*, WU Jin-rong, ZHENG Jing

(College of Polymer Science and Engineering, State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering,
Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Damping materials, especially rubber damping materials, are a kind of special functional materials to absorb vibration and reduce noise. Because they can improve the work environment of human and machine and moreover enhance the design and manufacturing level, damping rubber materials have been widely used in multitudinous fields as high-speed train and light rail, aviation and spaceflight, marine warships, mechanical engineering and national security etc. However, with the speedy progress in social civilization, design and manufacture level, and the high and new technology, the quality requirement to rubber damping materials is becoming higher. It encourages the novel high performance damping rubber materials being competitively researched and exploited. In the article we will comment the latest research progress in damping rubber materials from such aspects as the rubber matrix selections, molecular structure and microstructure design, as well as construction on special damping mechanism etc.

Key words: Damping materials; Rubber; Progress