

磁流变弹性体及其半主动吸振技术

龚兴龙, 邓华夏, 李剑锋, 陈琳, 张培强

(中国科学技术大学近代力学系, 中国科学院材料力学行为与设计重点实验室, 安徽合肥 230027)

摘要:磁流变材料是一类智能材料的总称, 它们的流变特性能够用外加的磁场来控制. 磁流变弹性体是这类材料中的新成员, 它是将微米尺度的软磁性颗粒混合于液态或粘塑性体高分子聚合物中, 形成特殊有序结构后固化而成. 其典型特征是弹性剪切模量可由外场控制, 此外它还具备其他磁控性能如磁控电阻等. 这些独特的优点使其在调谐吸振器、可调刚度的悬挂系统和可调阻抗表面等领域有着巨大的应用前景. 论文介绍我们课题组近年来在磁流变弹性体的研制、力学性能的实验和理论表征, 及其在半主动吸振技术中的应用等方面的研究.

关键词:磁流变弹性体; 磁敏高弹体; 半主动吸振技术; 吸振器

中图分类号: O326 文献标识码: A

Magnetorheological elastomers and corresponding semi-active vibration absorption technology

GONG Xing-long, DENG Hua-xia, LI Jian-feng, CHEN Lin, ZHANG Pei-qiang

(Department of Modern Mechanics, CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Magnetorheological elastomers (MREs) are a kind of smart material whose rheological properties could be controlled by the applied magnetic field. They are composed of rubber and magnetizable particles. When the mixtures are cured in the presence of a magnetic field, the particles are arranged in chains, columns or layers due to the MR effect. The unique characteristics that their modulus could be controlled by the magnetic field reversely, quickly made them could be applied for many fields such as stiffness controllable suspensions and adaptive surface. Our recent research progress on MREs was introduced. It includes the material fabrication, the testing system and the mechanical properties, and their application in semi-active vibration absorption technology.

Key words: magnetorheological elastomers; magneto-sensitive elastomer; semi-active vibration absorption technology; vibration absorber

0 引言

磁流变材料是一种流变性能可由磁场控制的新

型智能材料. 由于其响应快(ms 量级)、可逆性好(撤去磁场后, 又恢复初始状态)以及通过调节磁场大小来控制材料的力学性能连续变化, 因而近年来在汽

车、建筑、振动控制等领域得到广泛应用。

磁流变弹性体(magnetorheological elastomers, MR elastomers)是磁流变材料的一个新的分支,它是将微米尺度的软磁性颗粒混合于液态或粘塑性体高分子聚合物中,形成特殊有序结构后固化而成。这样的材料在磁场中,其力学、电学诸性能将随所加磁场强度而变化。由于它兼有磁流变材料和弹性体的优点,如响应快,可逆性好,可控能力强等,又克服了磁流变液沉降、稳定性差等缺点,因而近年来成为磁流变材料研究的一个热点。它可以广泛应用于机械传动,减振隔振,机器人和智能执行机构等领域,可以大大简化机械结构,提高警惕系统的控制性能,完成一些传统机械结构难以实现的功能。

磁流变弹性体是由“magnetorheological elastomers”翻译过来的。因为与磁流变液的渊源,因而在国际上大多采用“magnetorheological elastomers”这个英文名称,不过也有人称其为“magnetoactive elastomers”^[1]、“magneto-sensitive rubber”^[2]等。实际上,这种材料的一些力学性能会随着所加磁场的变化而改变,但其流变性能随磁场的变化不明显。因此,称它为“磁流变弹性体”有点欠妥。就此笔者曾向郑哲敏院士和伍小平院士请教,他们建议称其“磁敏高弹体”也许更合适。限于各种因素,在此暂且仍称其为磁流变弹性体。

利用磁流变效应来进行磁流变弹性体材料设计的观念最早可以追溯到日本的 Shiga 等在 1995 年发表的文章^[3],他们用硅树脂和铁粉混合制备出的具有磁控性能的材料,该材料当时被称为具有磁致粘弹性的凝胶。随后美国 Lord 公司的研究人员 Jolly 等对磁流变弹性体的力学性能进行了初步测试和分析,在使用硅橡胶作为基体制备出的磁流变弹性体,外加磁场在 0.8 T 时,磁流变弹性体的剪切模量比无磁场时初始值增加约 40%^[4];Ford 公司研究组成员 Ginder 等对基体为天然橡胶的磁流变弹性体进行了建模并对其粘弹性行为进行了研究^[5],Davis 理论计算发现颗粒的最佳体积比为 27%,此时磁饱和后其剪切模量的相对改变量为 50%^[6];法国的 Bossis 则对电磁流变弹性体的电学、磁学、光学等物理性质进行了初步的观测^[7];波兰的 Bednarek 也对磁流变弹性体的磁致伸缩特性进行了较系统分析^[8];白俄罗斯的 Demchuk 等分别以明胶、普通硅橡胶以及一种热敏性硅橡胶作为基体材料制备出磁流变弹性体^[9];瑞典的 Lokander 等在制

备时基体分别使用了苯橡胶、丁腈橡胶与丙烯腈的不同组合以及天然橡胶,同时发现即使固化时不加磁场,选用形状不规则较大的纯铁颗粒的磁流变弹性体的效应也很明显,在外加磁场为 0.8 T 时剪切模量的相对增加量可达 20%^[10,11];加拿大的 Shen 等分别用聚氨酯和天然橡胶作基体制备了磁流变弹性体,其剪切模量在 0.395 T 时分别增加了 28%和 8%^[12]。最近瑞典的 Blom 等对无磁制备的磁流变弹性体的粘弹性与加载频率和幅度的关系进行了研究,并得到了硅橡胶基磁流变弹性体 115%的最佳剪切模量相对增加量^[2]。在本构关系和力学建模方面,继 Davis 沿用磁流变液的方法采用偶极子模型粗略地计算了磁致剪切模量相对改变量^[6]之后,Dorfmann 等在各向同性和弹性的假设下建立了磁流变弹性体连续介质模型^[1,13],Triantafyllidis 也建立了相似的模型^[14],Yin 和 Sun(孙立志, Iowa 大学)用 Green 函数模拟了磁流变弹性体的力磁耦合行为^[15],但仍然局限于弹性范围。

尽管磁流变弹性体的研究才刚刚开始,但是磁流变弹性体已显示出了巨大的应用潜力。磁流变弹性体在汽车减振、减噪等领域都能够替代传统的器件,如悬挂系统、发动机架、轴衬、吸振器等^[16]。与传统器件只能进行被动控制相比,磁流变弹性体的力学性能可以由磁场连续改变,因而能够根据外部条件实现半主动控制。Ford 汽车公司已经申请了一个基于磁流变弹性体的轴衬的专利^[17]。Ginder 等利用磁流变弹性体的力学性能可由磁场控制,设计出了能在轴向和径向实现不同的刚度控制的磁流变弹性体轴衬^[5,18]。2001 年,美国福特研究中心材料科学研究所的 Ginder 等进行磁流变弹性体吸振器的开创性工作^[19],研制成功了一种可在 500~600 Hz 移频的磁流变弹性体吸振器原理样机。随后,美国多个大学和研究所开始了磁流变弹性体吸振器的研究,美国佐治亚理工大学研究了压缩式磁流变弹性体吸振器的移频特性及其控制方法^[20,21],并申请了专利^[22];美国迈阿密大学也于近年展开了磁流变弹性体吸振器的研究,主要研究了基于双模态粒子分布的磁流变弹性体吸振器的特性^[23];澳大利亚卧龙岗大学对磁流变弹性体吸振器的特性进行了仿真,并研究了其用于汽车引擎减振的前景^[24]。

总体来说,目前尚未研制出可实际应用的磁流变弹性体,而磁流变弹性体的相关应用研究更处于起步阶段。近年来中国科学技术大学近代力学系智

能材料和振动控制实验室于国内率先在磁流变弹性体方面开展了大量的研究,取得了重要的突破. 本文将介绍所取得的一些研究成果,并简要展望磁流变弹性体的未来发展.

1 磁流变弹性体材料的研制

磁流变弹性体是由软铁磁性颗粒以某种方式分布在粘弹性体基体中而组成的. 实验和理论均证明分散质颗粒的种类、大小、形状、排列方式,添加剂以及基体的种类等对磁流变弹性体的机械性能和材料本身的磁流变效应都有着不同程度的影响. 因此,磁流变弹性体材料制备的研究主要集中于对颗粒制备、颗粒在基体中的微观结构、基体和添加剂的研究.

1.1 分散质颗粒

颗粒的研制包括颗粒单体的制备、颗粒的形貌控制和颗粒的改性. 颗粒单体的制备方法有物理法和化学法,物理制备方法主要包括研磨和球磨等;化学制备方法包括湿化学法和煅烧法等,其中湿化学法又包括水热法和熔胶-凝胶法等. 一般颗粒的形貌控制包括控制粒子结构、粒径、表面状态、粒子等轴性和粒子孔隙度. 对金属粉末材料进行改性的主要方法有:加入表面改性剂,填料表面接枝和表面包覆等. 常用的表面改性剂有偶联剂、高级脂肪酸及其盐、表面活性剂、不饱和有机酸和有机硅等. 我们利用水热法^[25,26],实现了一步制备 Fe_3O_4 颗粒. 该方法改变了过去需两步制备磁性颗粒的现象. 传统的方法是第一步先用各种方法制备磁性颗粒初体,这种颗粒的表面一般为惰性的,需要第二步进行表面改性;第二步是以颗粒初体为载体与其他物质相结合,制备所需的铁磁性颗粒,该颗粒具有良好的软铁磁性. 我们的方法利用葡萄糖在碱性环境下还原 Fe^{3+} 获得,并利用 XRD, HRTEM 等研究了这一颗粒的诸多性质,实验表明该磁性粒子具有良好的软磁性. 利用熔胶-凝胶法^[27,28]也可以制备具有良好软磁性能的 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 ,该方法的好处在于可以很好地控制颗粒的形貌,制备出了各种粒径的椭球形颗粒(如图 1 所示). 并且,利用该方法还可以通过碳化还原的方法,制成中空的核壳结构的颗粒. 这种颗粒的磁滞曲线如图 2 所示,由图中可以看出该颗粒的矫顽力很小为 270 Oe,磁饱和强度达到了 6 000 Oe. 在材料改性方面,我们用化学沉积方法^[29],首先在微米级羰基铁粉表面均匀镀上一层纳米级金属

钴,然后再对表面进行其他处理,以改善磁性材料的表面均匀性、提高饱和磁化强度并增强磁流变效应.

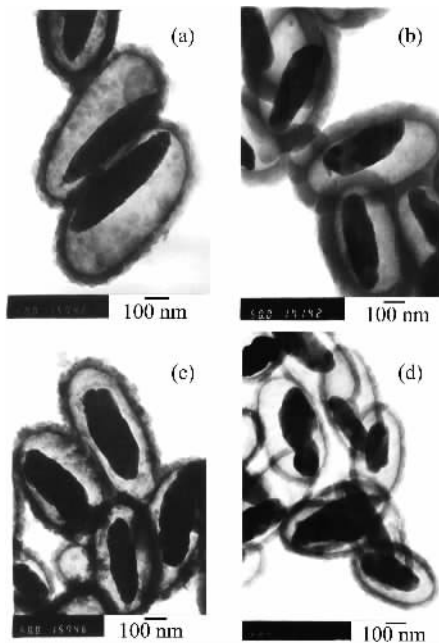


图 1 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3@Air@PPy$ (a), 以及具有 55 (b), 25 (c), 15 (d) 纳米厚碳壳椭球形 $\text{Fe}_3\text{O}_4@Air@C$ 磁性颗粒的 TEM 照片^[27]

Fig. 1 TEM images of $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3@Air@PPy$ (a) and $\text{Fe}_3\text{O}_4@Air@C$ capsules with the 55 (b), 25 (c), and 15 (d) nm thickness carbon shell^[27]

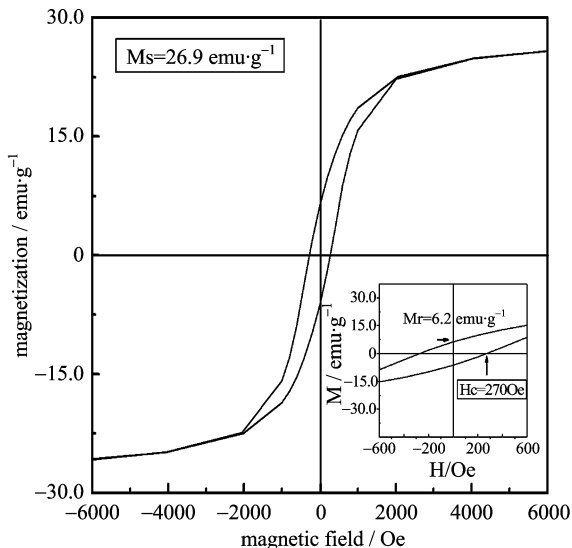
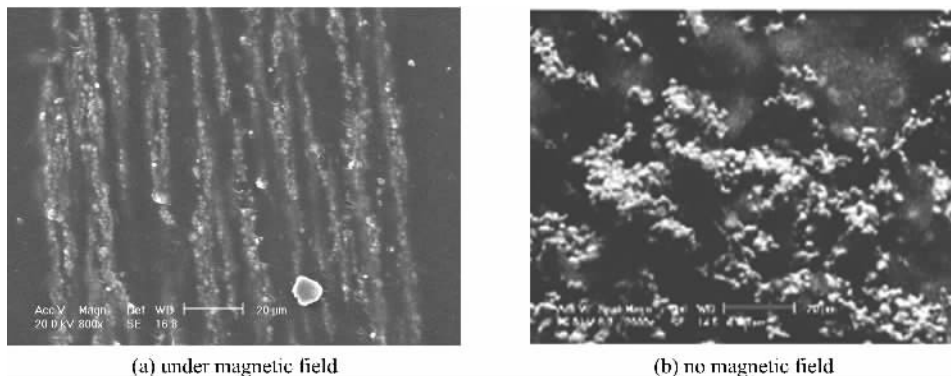


图 2 $\text{Fe}_3\text{O}_4@Air@C$ 颗粒的磁滞回线^[27]

Fig. 2 Magnetic hysteresis loops of $\text{Fe}_3\text{O}_4@Air@C$ spheres^[27]

1.2 基体和制备工艺

按照颗粒在基体中的分布可以将磁流变弹性体



(a) under magnetic field

(b) no magnetic field

图 3 磁流变弹性体的微观结构^[30,31]

Fig. 3 Microstructure of magnetorheological elastomers fabricated^[30,31]

分为预结构化和非结构化磁流变弹性体,或者称为各向异性和各向同性,还可以称之为有场制备和无场制备的磁流变弹性体. 预结构化磁流变弹性体是一种各向异性的材料^[30],它的制备方法一般是在基体固化时,外加一强磁场,使颗粒在基体中呈链状或者柱状结构,并使之固化于基体内,固化完成后颗粒便处于这种有序结构的状态. 与之对应,非结构化磁流变弹性体是一种各向同性的材料^[31],它在制备时一般不施加外磁场,颗粒在基体中成某种无序的结构. 图 3 所示即为预结构化磁流变弹性体和非结构化磁流变弹性体的微观结构 SEM 照片. 一般认为,颗粒在基体中的分布所形成的微观结构在很大程度上决定了磁流变弹性体的磁流变效应. 预结构化的磁流变弹性体的磁流变效应一般是非结构化磁流变弹性体的数倍,不过非结构化磁流变弹性体的制备相对简单,而且是各向同性材料,应用方便. 预结构化的磁流变弹性体的制备方法相对复杂,需要提供较大的能量形成颗粒的有序排列,而且预结构化的磁流变弹性体为各向异性材料,应用时要注意外加磁场与颗粒的成链方向.

对磁流变弹性体制备的方式,根据不同基体的特点,从基体加工时的状态我们可将其分为三大类:塑性体状态、流体状态和混合状态. 所谓塑性体状态制备一方面是指现在普遍采用的工业橡胶标准生产工艺,其主要原料是天然橡胶和各种合成橡胶,采用塑炼、混炼(如图 4 所示)、压延和硫化等工序生产出弹性体成品. 在混炼过程中加入铁磁性颗粒,并在硫化过程中可以通过施加外部磁场形成有序结构,或是使用热塑性橡胶,在热塑状态下加入铁磁性颗粒,可以在磁场下冷却固化. 流体状态制备则是采用液体状态的橡胶基体(如硅橡胶、橡胶溶液和液体橡胶



图 4 双滚筒混炼机

Fig. 4 Two roll mixer

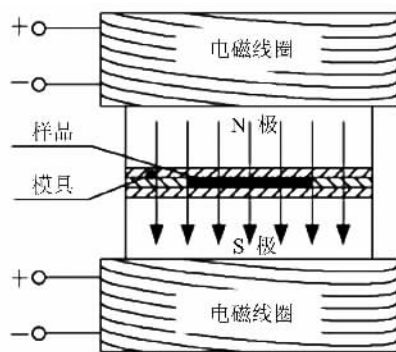


图 5 有场制备磁流变弹性体装置

Fig. 5 Device for fabrication under magnetic field

等)和铁磁性颗粒混合后,形成流体混合物,可以在磁场下(如图 5 所示)硫化形成有序结构. 上述两种方式现在是磁流变弹性体制备的主要方式. 混合状态是将塑性体状态和流体状态的基体混合成一种基体^[32],加入铁磁性颗粒,从而制备磁流变弹性体. 我们用丁基橡胶为基体利用塑性体状态制备方法制成了非结构化磁流变弹性体并测试了其多项性能^[33];利用硅橡胶^[31]为基体制备了非结构化磁流变弹性

体,发现在无场下制备的材料,其磁流变效应与颗粒在基体中所成的某种聚集结构有关,认为非均匀分布有利于提高磁流变效应;还利用 γ 辐射的方法固化甲基乙烯基硅橡胶^[34,35],制备了各向同性磁流变弹性体,为磁流变弹性体的制备提供了新的思路.利用天然橡胶在有场条件下制备了磁流变效应达到 133% 的磁流变弹性体,并测试了其相关机械性能,为制备实用型磁流变弹性体打下了基础;利用硅橡胶制备了磁流变效应达 878% 的高效磁流变弹性体,该成果在第十届国际电磁流变会议发表,受到了国际同行的关注^[36].

1.3 添加剂

添加剂在磁流变弹性体的制备中有着重要的影响,按照添加剂的作用可以分为表面改性剂、增塑剂、交联补强剂和防老化剂等等.

常用的表面改性剂有偶联剂、高级脂肪酸及其盐、表面活性剂、不饱和有机酸和有机硅等.表面活性物质分子一般由非极性亲油部分和极性亲水部分组成,且两部分分别处于分子两端,形成不对称结构.当表面活性物质与金属物质充分接触时,极性亲水基团极易与金属表面通过氢键或范德华力形成弱化学作用,将金属颗粒表面包裹起来.我们曾经用不同的表面活性剂^[37],如 Span-40、Tween-80、硬脂酸和油酸钠等,对羰基铁粉进行表面处理,处理后的粒子用于磁流变液,沉降稳定性有明显改善.

偶联剂是最常用的表面改性剂,按化学结构分为硅烷类、钛酸酯类、锆类和有机铬合物等类型.偶联剂等改性剂对无机物的表面进行的改性及应用主要有预处理法和整体掺合法两种途径.前者是将金属粒子首先改性处理,再加入至聚合物中形成复合体;后者将塑料等聚合物制品的部分加工工艺与金属粒子的改性工艺结合起来,一般认为预处理改性效果优于整体掺合法.

增塑剂是一类不易挥发的低分子量的有机化合物,其作用是降低胶料的粘度、改善加工性能,使填充补强剂分散均匀,便于压延等一系列工艺操作.经过研究表明,增塑剂可以软化基体,提高磁致模量,从而提高磁流变效应.并且由于增塑剂进入橡胶后,增大了分子间距离,使大分子链较易滑动,均匀化了内部应力,此时橡胶的强度并没有多少降低.同时,由于基体内部一些缺陷被增塑剂填充,材料的软化性和流动性增大,使得一些情况下撕裂强度上升,因此增塑剂不会对基体的机械性能产生较大影响,研

究还表明,增塑剂可以降低基体与颗粒间的相互作用力^[38],使颗粒在预成型阶段能够充分运动,从而使颗粒的成链结构更为充分,提高磁流变弹性体的磁致模量.

2 磁流变弹性体的力学性能的实验表征

磁流变弹性体材料的力学参数很多,其测试系统可以分为静态性能测试系统、动态性能测试系统和机械性能测试系统.动态性能尤其是磁流变弹性体的动态磁控性能是磁流变弹性体的关键性能参数^[39].

材料的静态力学行为是材料在恒定或单调递增应力(或应变)作用下的力学行为.利用多功能电子拉伸仪,辅加自制的各种夹具和可变磁场,可以测量磁流变弹性体在磁场下的拉伸、压缩、弯曲、剪切、撕裂和剥离.

材料的动态性能测试是指材料在动态(交变)应力(或应变)作用下的响应.与磁流变液工作在屈服后阶段(屈服即颗粒的链状结构被破坏)不同,磁流变弹性体工作在预屈服阶段,因而考察其力学性能的力学量也不相同.前者一般用剪切屈服应力 τ ,而后者通过剪切模量 G 来衡量.如同大多数粘弹性材料一样,其剪切模量是复模量,与频率 ω 和温度有关,可以表示为

$$\tilde{G}(j\omega) = G(1 + j\eta). \quad (1)$$

式中, G 为储能模量(storage modulus); η 为材料损耗因子(loss factor);二者都与 ω 有关, j 为虚数单位.按照测试频段的不同,动态力学测试系统又分为低频测试系统和高频测试系统.

低频测试系统的工作频段一般低于 100 Hz,该系统是在英国 Triton Technology 公司的 Tritec2000 型 DMA 的基础上,配加磁场,使其能够在可变磁场下测试材料的剪切模量和损耗因子随测试频率、温度、时间、应变(或应力)和环境因素(如湿度)等与磁场间的关系.这一测试系统又被称为力磁耦合动态力学测试系统(MMDMA),其测试系统如图 6 所示.

图 7 所示为自制硅橡胶基磁流变弹性体在 MMDMA 测试系统中的剪切状态下的力学特性.由图 7 可以看出,该磁流变弹性体的剪切模量随着磁场的增加而增加.按照磁场的场强和剪切模量的增加方式,可以分为快速增加区域,平稳增加区域和逐

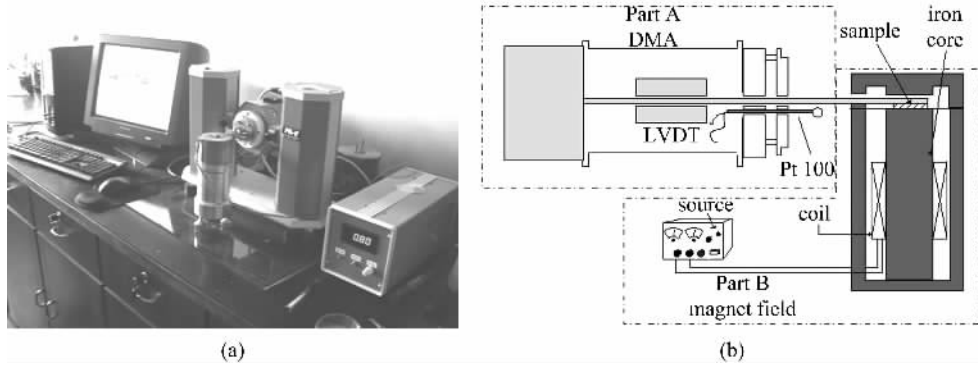


图 6 低频测试系统实物图(a)与示意图(b)
 Fig. 6 The photograph (a) and the sketch (b) of modified DMA test system

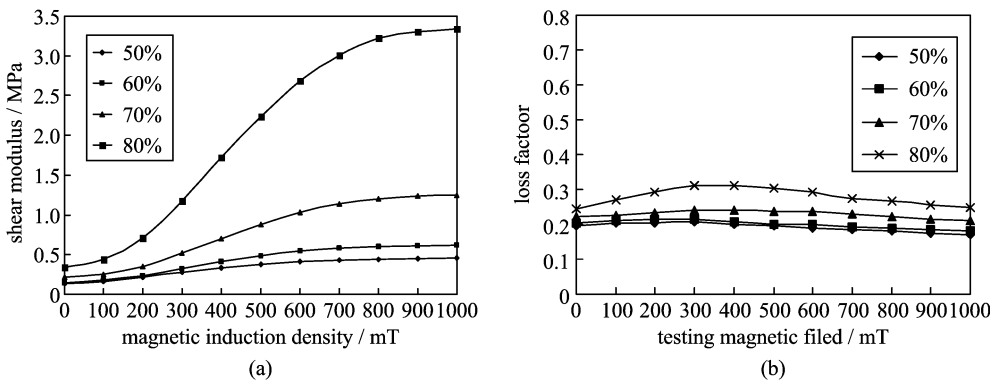
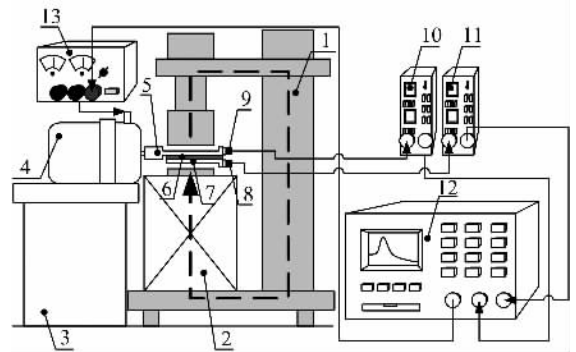


图 7 不同铁粉含量的磁流变弹性体的剪切模量(a)与损耗因子(b)^[36]
 Fig. 7 Shear modulus (a), loss factor (b) of MREs with different content of particles^[36]

渐饱和区域. 快速增加区域为 0~400 mT, 在这一区域颗粒开始被磁化, 剪切模量迅速上升; 平稳增加区域为 400~700 mT, 在这一区域颗粒中局部区域(如球冠部分)如达到饱和, 剪切模量上升速度平稳; 700 mT 以上区域为逐渐饱和区域, 在这一区域部分颗粒达到饱和, 剪切模量增加速度放缓, 并渐渐达到饱和而不随磁场增加而增加. 磁流变弹性体的磁致剪切模量达到了 3 MPa, 磁流变效应达到近 878%. 同时还可以看出, 材料的零场剪切模量随着铁粉含量的上升而略有增加, 这与铁粉有一定的补强作用相符. 与之对应, 材料的损耗因子几乎不随磁场的增加和频率的变化而变化.

为了实现材料的高频测试, 根据粘弹性理论, 利用 WLF 方程, 可以通过低温等效高频的办法拓展低频测试系统的工作频率. 不过为了能够直接测试系统的高频性能, 我们建立了如图 8 所示的高频测试系统测试装置. 电磁铁产生的磁场的磁路如虚线 1 所示, 其大小通过调节线圈中电流的大小来实现, 电磁铁间隙处的磁场最大可达到 600 mT, 实验中特



1. 铁磁支撑架(虚线表示形成的磁路) 2. 线圈 3. 可调高度的基座
 4. 激振器 5. 铜板 2 6. 待测样品 7. 铜板 1 8. 加速度传感器 1
 9. 加速度传感器 2 10. 电荷放大器 1 11. 电荷放大器 2
 12. HP35665A 频谱分析仪 13. 功率放大器

图 8 高频测试系统示意图
 Fig. 8 The sketch of test system working with high frequencies

斯拉计可测量其大小. 通过激振器使铜板 2 产生基础激励, 该激振器由频谱分析仪产生的信号源通过功率放大器驱动. 在这里我们使用的是随机信号源,

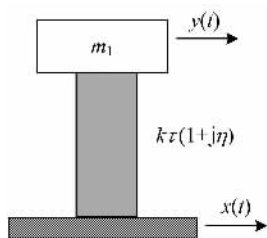


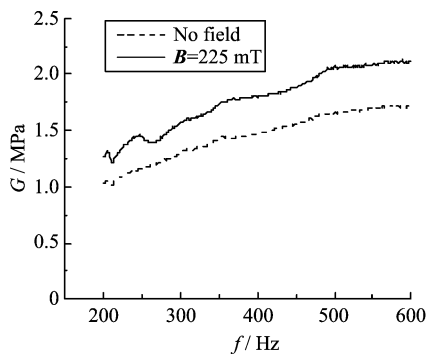
图 9 实验简化模型

Fig. 9 Mechanical model of the experiment

最高频率选用 800 Hz. 两块铜板的运动通过两个相同增益的压电加速度传感器和电荷放大器被转换为电信号,使用频谱分析仪对这两个信号进行采样分析处理. 把粘在磁流变弹性体上的铜板 1 作为研究对象,力学模型简化为如图 9 所示,即把磁流变弹性体简化为具有复刚度的单自由度系统. 图中 $K_r = GA/h$, A 为样品的表面积, h 为厚度. $y(t)$ 为响应信号, $x(t)$ 为基础激励信号. 通过在频率域分析响应信号(加速度传感器 1)与基础激励信号(加速度传感器 2)之比(即传递函数)得到磁流变弹性体的粘弹性参数. 尽管传感器产生的信号经过后续放大,但由于两者增益相同,因而比值仍然不变. 考虑磁流变弹性体样品的质量具有的附加动能,由 Rayleigh 法知,其等效质量为 $m_e = m_2/3$, 其中 m_2 为样品的质量. 令 $M = m_1 + m_e$ 其中 m_1 为铜板 1 的质量. 则频率域下的传递函数为

$$T(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{k_r(1+j\eta)}{-M\omega^2 + k_r(1+j\eta)}. \quad (2)$$

式中, T 为传递函数,可直接由频谱分析仪得到, Y , X 分别为 y , x 的傅立叶变换. 由式(2)可得到不同频率下的剪切模量和损耗因子. 图 10 所示为硅橡胶基磁流变弹性体在高频剪切下的力学行为. 从图中可以看出,其力学行为特性与低频剪切下几乎相同,



剪切模量随着磁场的增加而显著增加. 同时还可以看出,剪切模量随着激励频率的升高而略有上升,这与材料的粘弹常规性能是符合的,与之对应,损耗因子几乎不随频率和磁场变化.

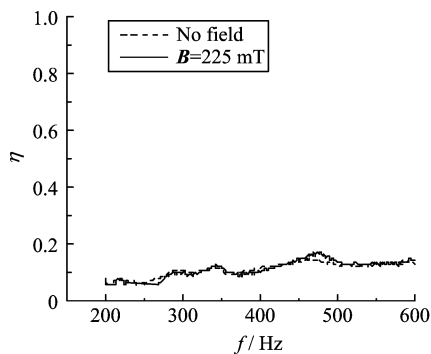
材料的实用性要求必须具备满足应用条件要求的机械性能. 为此,我们建立了一系列包括硬度计、冲击弹性实验机、磨损实验机、橡胶疲劳龟裂试验机 and 老化箱等一系列橡胶机械性能的常规评价系统,以测试材料的硬度、回弹、磨损、疲劳和老化性能. 评价结果表明,我们制备的磁流变弹性体都具有与基体同等量级的机械性能,基本满足使用要求.

3 磁流变弹性体力学性能的理论表征

磁流变弹性体的磁致剪切模量是其标志性的力学特性,因此,如何建立有效的模型来描述这一独特的特性,则成为磁流变弹性体的力学行为分析工作的关键. 一般认为,铁磁性颗粒在磁场作用下被磁化,铁磁性颗粒间的磁相互作用力引起了磁致模量的改变. 并且认为磁流变弹性体固化后,颗粒沿着固化时的外加磁场方向呈链状或柱状结构排列. Jolly 曾给出了预结构化磁流变弹性体的一种物理模型^[4]. 这种模型认为每一个在磁场下的被磁化颗粒都能被当作磁偶极子来处理,因此又被称为偶极子模型. 通过计算磁场下颗粒之间的相互作用能和能量密度,对剪切应变求导,就能求出弹性体在磁场下的磁致剪切模量. 在偶极子模型的基础上,我们通过偶极子理论发展了多链模型,并将此模型推广到颗粒分布为 BCT 结构和层状结构的磁流变弹性体;考虑局部场效应,将传统的偶极子模型修正为局部场模型.

3.1 偶极子理论的多链模型

一般认为铁磁性颗粒在磁场作用下被磁化,铁

图 10 磁流变弹性体高频剪切下的力学行为^[41]Fig. 10 Testing result of MRE under high frequency shear^[41]

磁性颗粒之间的磁作用力引起磁流变弹性体剪切模量的改变. 传统偶极子模型对磁流变弹性体的机理进行分析时均以单链结构为基础, 多链模型^[40]首先对平行等间距链状结构进行建模, 建模时计及了周围链的影响, 并且周围链数可以为任意值.

假设磁场方向与链起始时的方向一致, 由铁磁性球形颗粒形成的单链是理想的, 颗粒之间的间距相等, 并且颗粒大小相等. 两个磁偶极矩分别为 m_1 和 m_2 , 相距为 r 的磁偶极子, 它们之间的磁相互作用能为

$$E_{12} = \frac{1}{4\pi\mu_0\mu_f} \left(\frac{\mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{m}_2}{r^3} - \frac{3}{r^5} (\mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{r})(\mathbf{m}_2 \cdot \mathbf{r}) \right). \quad (3)$$

假设弹性体发生剪切变形后, 链偏离原来位置角度为 θ . 磁流变弹性体中链未形成聚集结构, 链与链之间平行等间隔排列. 设相邻链与链之间的间隔为 D_0 , 链内相邻颗粒之间距离为 d_0 , 颗粒半径大小为 R , 链的方向与磁场方向一致. 任取一颗粒为坐标原点, 建立三维直角坐标系, 如图 11 所示. 记空间任意位置处颗粒坐标为 (x, y, z) .

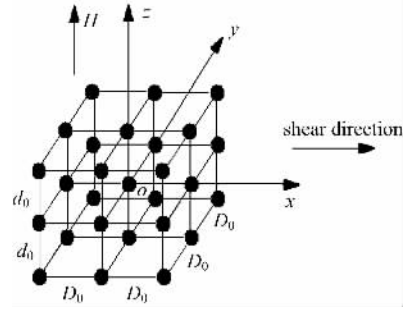


图 11 颗粒空间坐标示意图

Fig. 11 Sketch of cartesian coordinates

位于坐标原点处的颗粒与位于空间各处的颗粒之间都有磁相互作用能, 对式(3)求和就可以得到位于坐标原点处的颗粒受到的磁相互作用能总和为

$$E = \sum \frac{m^2}{4\pi\mu_0\mu_f} \frac{(x + \gamma z)^2 + y^2 - 2z^2}{((x + \gamma z)^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}}. \quad (4)$$

设磁流变弹性体的体积为 V , 颗粒体积比浓度为 ϕ , 记 $x = kD_0, y = mD_0, z = nd_0$, 由于链平行等间距排列, 故 k, m, n 都为整数. 令 $\lambda = D_0/d_0$, 即相邻链间距离与链内相邻颗粒距离的比值, 将所有相互作用能求和并对剪应变求导可得磁致剪切模量为

$$\Delta G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{9m^2\phi}{32\pi^2\mu_0\mu_f d_0^3 R^3 \gamma} \sum_{k=-k_{\max}}^{k_{\max}} \sum_{m=-m_{\max}}^{m_{\max}} \sum_{n=-n_{\max}}^{n_{\max}} \frac{n(k\lambda + \gamma m)(4n^2 - (k\lambda + \gamma m)^2 - (m\lambda)^2)}{((k\lambda + \gamma m)^2 + (m\lambda)^2 + n^2)^{\frac{7}{2}}}. \quad (5)$$

利用该模型可以很方便地计算各种结构颗粒分布的磁流变弹性体的磁流变效应. 计算结果表明, 传统的单链模型偶极子理论高估了磁流变弹性体的磁致剪切模量, 并且若仅考虑磁相互作用能, 在提高磁流变弹性体的磁致剪切模量方面, 颗粒体积比浓度较小时, 链状结构比柱状结构要好; 而当颗粒体积比浓度较大时, 柱状结构优于链状结构. 对于柱状结构, 铁磁颗粒体积比分数一定时, 磁流变弹性体磁致剪切模量会随着柱内链数的增加而减小. 计算结果还表明, 对于含层状结构的磁流变弹性体, 其磁致剪切模量比含柱状结构的明显要大, 不管聚集结构大小如何, 柱状结构的磁致模量始终低于层状结构的磁致模量. 可见, 在提高磁流变弹性体的磁致剪切模量方面, 层状结构优于柱状结构. 这为磁流变弹性体的制备提供了一条新的可发展方向.

3.2 局部场理论的单链模型

我们在偶极子模型基础上, 考虑局部场效应, 发展了一种偶极子模型的修正模型. 所谓局部场效应就是颗粒在磁化后产生的磁场会引起周围颗粒的再

次磁化. 这时, 颗粒的磁场包括外加磁场、颗粒在外加磁场作用下磁化后产生的附加磁场, 这两个场将共同引起颗粒的磁化, 这就是局部场效应. 利用局部场单链模型推出的磁致模量的近似公式为

$$\Delta G = 3\phi\mu_f\mu_0\beta^2 H_0^2 \left(\frac{R}{d}\right)^3 \zeta \left[\left(\frac{10}{A^2} + \frac{2}{B^2}\right) + \frac{48\beta}{A^3} \left(\frac{R}{d}\right)^3 \right]. \quad (6)$$

式中, μ_0 为真空磁导率; $\beta = (\mu_p - \mu_f)/(\mu_p + 2\mu_f)$; μ_p, μ_f 分别为颗粒和基体的相对磁导率, 对于铁磁性颗粒 $\mu_p \approx 10^3$, 而 $\mu_f \approx 1$, 因而 $\beta \approx 1$. $V = (4/3)\pi R^3$, R 为颗粒半径, H_0 为外加磁场; d 为变形前两相邻颗粒的间距; θ 为变形后链与磁场的夹角. 其中, $A = 1 - 4\beta\cos^3\theta(R/d)^3\zeta, B = 1 + 2\beta\cos^3\theta(R/d)^3\zeta, \zeta = \sum_{k=1}^{\infty} 1/k^3 \approx 1.202, H_0 = |\mathbf{H}_0|$. 利用偶极子模型推出的磁致剪切模量的近似公式如下:

$$\Delta G_d = 36\phi\mu_f\mu_0\beta^2 H_0^2 \left(\frac{R}{d}\right)^3 \zeta. \quad (7)$$

图 12 为仅考虑单链局部场效应的模型^[41]与偶极子模型计算磁致剪切模量的比较. 从图中可以看出, 在颗粒间距 d 较小时, 由局部场模型计算得到的曲线更加陡峭, 而在间距较大时两者吻合得很好. 这说明偶极子模型低估了小间距下的磁场作用, 事实上在小间距下, 磁偶极子模型将不再适用.

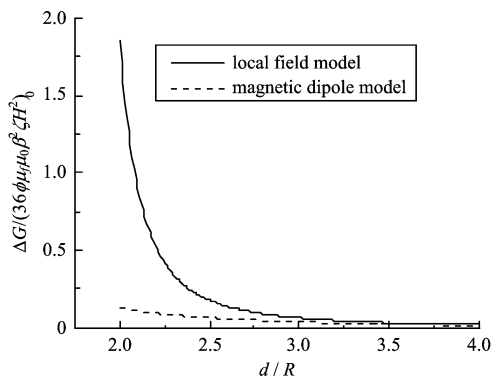


图 12 两种模型计算得到的磁致剪切模量随颗粒间距变化曲线图^[41]

Fig. 12 Comparison of the increases of magneto-shear modulus at various gaps between two models^[41]

3.3 局部场理论的分布链模型

在单链局部场模型的基础上, 进一步引入了分布函数来描述链的分布, 并分析了与磁场方向不一致的斜链的磁流变效应, 发展了分布链模型^[42]. 该模型考虑磁流变弹性体中链的方向分布的基础上, 对磁流变弹性体的偶极子模型做出了修正. 用局部场的方法计算了链的势能, 引入了分布函数来描述链的分布, 并分析了与磁场方向不一致的斜链的磁流变效应, 进而通过积分叠加求得含有分布链的磁流变弹性体的磁流变效应. 在磁流变弹性体的理论模型中, 引入了制备磁场和基体性质等影响因素, 解释了为什么预结构化磁流变弹性体的磁流变效应要大大超过非结构化磁流变弹性体. 同时也指明了在制备过程中应当加大磁场强度, 降低磁流变弹性体基体的模量, 提高颗粒在基体中的流动性, 这些都会提高磁流变弹性体的磁流变效应.

除了以上几种理论表征方法外, 常用的磁流变弹性体力学性能表征方法还有磁导率法^[43]和有限元法等.

4 磁流变弹性体的应用与半主动吸振技术

由于磁流变弹性体具有剪切模量与外加磁场可

控性, 可逆性(去掉磁场又回复零场模量), 响应迅速(ms 量级), 稳定性好, 不需密封等优点, 因此虽然磁流变弹性体的研究还处于起步阶段, 就展现出了巨大的应用前景, 能够广泛应用于各种变刚度器件, 如汽车轴衬、柔顺表面等. 其中, 频率可调式半主动吸振技术是磁流变弹性体的一个重要的应用方向.

传统的动力吸振器一般是由振子、弹性元件和阻尼元件组成. 由于它具有结构简单, 能有效地抑制频率范围变化较小的结构与设备的振动的优点, 因此在工程实践中得以广泛的应用. 实际的振源往往复杂而且频率变化较大, 并且随着科学技术的发展, 人们对振动环境及结构设备的振动特性提出越来越高的要求. 但传统的被动式动力吸振器的有效吸振带宽较窄, 一般只针对振动系统的一个频率, 这就大大限制了动力吸振器的应用范围, 因此, 研究新型吸振技术非常必要.

近年来主动式动力吸振技术发展迅速, 主动式吸振技术又分为全主动式和半主动式. 全主动式吸振器是在传统被动吸振器上引入主动元件提供主动力, 直接作用于减振对象, 能进行频率跟踪控制, 减振频带宽, 减振效果好, 但需要的附加能量多. 半主动式吸振器一般通过改变吸振器的刚度等参数, 使其有效吸振频率跟踪减振对象的外干扰力频率, 吸振效果接近全主动式的吸振效果, 而且需要的控制能量小, 易于实现, 引起了大家的关注.

我们利用磁流变弹性体作为智能刚度单元, 设计并开发了多款磁流变弹性体频率可调式动力吸振器(MRE ATVA)^[44~49]. 这一新型吸振器的工作原理如图 13 所示, 图中 1 为吸振器, 2 为减振对象, 3A

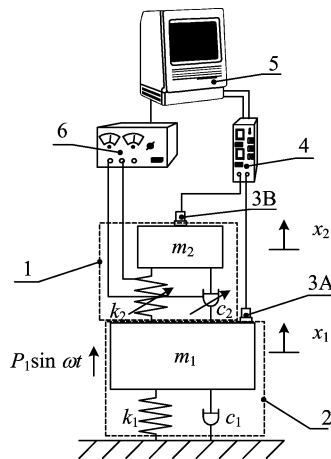


图 13 半主动吸振技术原理图

Fig. 13 Principle scheme of ATVA

与 3B 为加速度传感器,4 为电荷放大器,5 为控制系统,6 为功率放大器; m_1, k_1, c_1 分别为减振对象的等效质量、等效刚度和等效阻尼, m_1 上作用有激振力 $P_1 \sin \omega t$, x_1 代表其位移; m_2, k_2, c_2 是动力吸振器的等效吸振质量、等效刚度和等效阻尼,后两者代表了磁流变弹性体的特性, x_2 代表吸振质量的位移.当磁流变弹性体的外加磁场改变时,磁流变弹性体的剪切模量发生改变,在剪切方向上的剪切刚度也随之而发生改变,从而导致吸振器的固有频率发生改变.利用磁场控制磁流变弹性体,从而控制吸振器的固有频率,使之追踪外界激励的固有频率的变化,这就是磁流变弹性体移频式半主动吸振器的工作原理.

图 14 为两款磁流变弹性体移频式半主动吸振器的实物照片.图 15 为一种磁流变弹性体吸振器的移频图,该图显示随着电流的增加,磁流变弹性体移频式半主动吸振器的固有频率随之上升,其上升趋势也经历了快速增长区,平稳增长区和逐渐饱和区三个区域,这与磁流变弹性体本身的磁致模量曲线

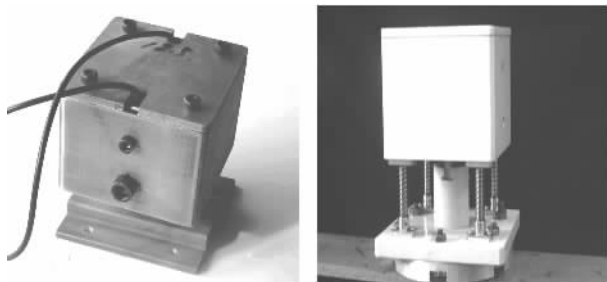


图 14 磁流变弹性体移频式半主动吸振器实物图

Fig. 14 Photograph of MRE adaptive tuned vibration absorber

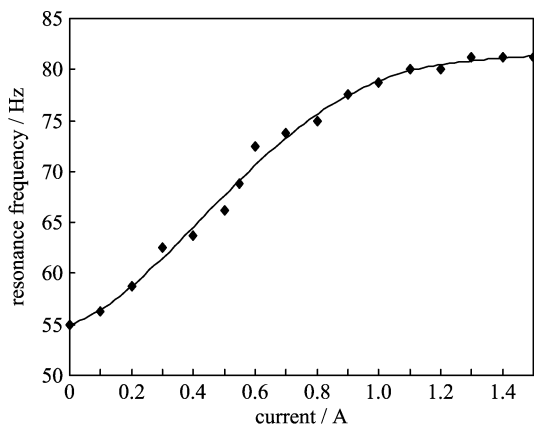


图 15 磁流变弹性体移频式半主动吸振器移频曲线图^[47]

Fig. 15 Shift frequency of MRE ATVA^[47]

是相符的,该吸振器的固有频率由 0 A 的 55 Hz 移到了 1.5 A 的 80 Hz 左右,移频范围达到了 25 Hz.

图 16 为这种新型吸振器的减振效果图.其中点为实验数据,线为理论计算值;▲为被动吸振器的实验数据,■为移频式半主动吸振器的实验数据.由图中可以看出,实验与理论符合得很好,这说明理论模型是合理的,实验结果是可靠的.同时还可以看出,在被动吸振器的固有频率 60 Hz 左右,两种吸振器具有相近的吸振效果,但随着激励频率的偏移,被动式吸振器的吸振效果急剧恶化,甚至出现了负效果,而移频式半主动吸振器的吸振频带更宽,吸振效果也更好,而且在整个工作频带内都没有出现急剧恶化的现象.

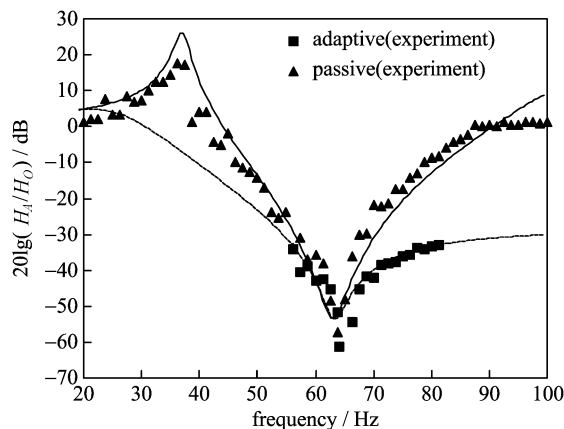


图 16 磁流变弹性体移频式半主动吸振器吸振效果图^[47]

Fig. 16 Ability of absorption of MRE ATVA^[47]

5 总结与展望

中国科技大学作为国内率先开展磁流变弹性体相关研究工作的团队,在磁流变弹性体的制备、测试、力学性能分析和应用各方面取得了丰硕成果.制备了具有国际领先水平的硅橡胶基和天然橡胶基磁流变弹性体;建立了一整套评价磁流变弹性体静态力学性能,动态力学性能和机械性能的测试系统;基于局部场理论,建立了描述磁流变弹性体磁致模量的单链、分布链、多链及各种结构的理论模型,较好地分析了磁流变弹性体的力学性能并对材料的制备提供了指导;利用磁流变弹性体的磁控刚度特性发展了一系列磁流变弹性体移频式半主动吸振器,该吸振器具有吸振频带宽,吸振效果好等优点.然而,由于磁流变弹性体是一个需要多学科交叉的复杂的智能材料体系,还有很多工作需要进一步的研究.

材料研制方面 需要进一步提高磁流变效应,改进磁流变弹性体的机械性能,制备出实用型磁流变弹性体,尤其是制备出具有适宜阻尼特性的实用型磁流变弹性体.这需要在颗粒改性、基体研究、颗粒与基体间相互作用等各方面进一步深入研究.

力学性能分析方面 目前大多数理论模型均没有考虑基体对磁流变效应的影响,而实验表明基体对磁流变效应有巨大的影响,如何建立一个能够准确描述磁流变弹性体力学本构关系的模型是一个艰巨而富有指导性的工作.

应用研究方面 由于目前的材料性能有限,基于磁流变弹性体的应用依然处于起步研究阶段,离实际工程应用相差甚远.需要对其材料性能进行进一步深入的研究,开发出更多更好的应用器件,同时促进磁流变弹性体制备的发展.

参考文献(References)

- [1] Brigadnov I A, Dorfmann A. Mathematical modeling of magneto-sensitive elastomers [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40: 4 659-4 674.
- [2] Blom P, Kari L. Amplitude and frequency dependence of magneto-sensitive rubber in a wide frequency range [J]. *Polymer Testing*, 2005, 24: 656-662.
- [3] Shiga T, Okada A, Kurauchi T. Magnetroviscoelastic behavior of composite gels [J]. *J Appl Polym Sci*, 1995, 58: 787-792.
- [4] Jolly M R, Carlson J D, Munoz B C, et al. The magnetroviscoelastic response of elastomer composites consisting of ferrous particles embedded in a polymer matrix [J]. *J Int Mat Sys Struct*, 1996, 7: 613-622.
- [5] Ginder J M, Nichols M E, Elie L D, et al. Magnetorheological elastomers: Properties and applications [C]//*Proceedings of SPIE: Smart Materials Technologies*, 1999, 3 675: 131-138.
- [6] Davis L C. Model of magnetorheological elastomers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 85: 3 348-3 351.
- [7] Bossis G. Electroactive and electrostructured elastomers [J]. *Int J Mod Phys B*, 2001, 5: 564-573.
- [8] Bednarek S. The giant magnetostriction in ferromagnetic composites within an elastomer matrix [J]. *Applied Physics A*, 1999, 68: 63-67.
- [9] Demchuk S A, Kuz'min V A. Viscoelastic properties of magnetorheological elastomers in the regime of dynamic deformation [J]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2002, 75: 396-400.
- [10] Lokander M, Stenberg B. Performance of isotropic magnetorheological rubber materials [J]. *Polymer Testing*, 2003, 22: 245-251.
- [11] Lokander M, Stenberg B. Improving the magnetorheological effect in isotropic magnetorheological rubber materials [J]. *Polymer Testing*, 2003, 22: 677-680.
- [12] Shen Y, Golnaraghi M F, Heppler G R. Experimental research and modeling of magnetorheological elastomers [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2004, 15: 27-35.
- [13] Dorfmann A, Ogden R W. Magnetoelastic modelling of elastomers [J]. *European Journal of Mechanics A/ Solids*, 2003, 22: 497-507.
- [14] Kankanala S V, Triantafyllidis N. On finitely strained magnetorheological elastomers [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2004, 52: 2 869-2 908.
- [15] Yin H M, Sun L Z. Magnetoelasticity of chain-structured ferromagnetic composites [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86: 261901.
- [16] Carlson J D, Jolly M R. MR fluid, foam and elastomer devices [J]. *Mechatronics*, 2000, 10: 555-569.
- [17] Watson J R. Method and apparatus for varying the stiffness of a suspension bushing [P]. US Patent, 5609353, 1997.
- [18] Ginder J M, Nichols M E, Elie L D, et al. Controllable-stiffness components based on magnetorheological elastomers [C]//*Proceedings of SPIE*, 2000, 3985: 418-425.
- [19] Ginder J M, Schlotter W F, Nichols M E. Magnetorheological elastomers in tunable vibration absorbers [C]//*Proceedings of SPIE*, 2001, 4331: 103-110.
- [20] Albanese A M, Cunefare K A. The temporal and spatial effects of a magnetorheological elastomer in squeeze mode [J]. *Acoustical Society of America Journal*, 2003, 114(4): 2 419.
- [21] Albanese A M, Cunefare K A. Properties of a magnetorheological semiactive vibration absorber [C]//*Proceedings of SPIE*, 2003, 5052: 36-43.
- [22] Albanese A M, Cunefare K A. Adaptable vibration absorber employing a magneto-rheological elastomer with variable gap length and methods and systems therefore [P]. US Patent, 7102474 B2, 2006.
- [23] von Lockette P R, Kadlowec J, Koo J H. Development of tunable vibration absorbers using magnetorheological elastomers with bimodal particle distribution [C]//*Proceedings of the 168th Technical Meeting of Rubber Division, American Chemical Society, Pittsburgh*,

- 2005.
- [24] Zhang X C, Zhang X Z, Li W H, et al. The simulation of magnetorheological elastomers adaptive tuned dynamic vibration absorber for automobile engine vibration control [J]. *Nonlinear Science and Complexity*, 2006, 1:418-425.
- [25] Xuan S H, Hao L Y, Jiang W Q, et al. A facile method to fabricate carbon-encapsulated Fe_3O_4 core/shell composites [J]. *Nanotechnology*, 2007, 18: 035602.
- [26] Xuan S H, Hao L Y, Jiang W Q, et al. Preparation of water-soluble magnetite nanocrystals through hydrothermal approach[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, 308:210-213.
- [27] Hao L Y, Xuan S H, Gong X L, et al. Ellipsoidal carbon capsules encapsulated movable magnetite nanorods [J]. *Chemistry Letters*, 2007, 36 (1): 126-127.
- [28] Hao L Y, Gong X L, Xuan S H, et al. Controllable fabrication and characterization of biocompatible core-shell particles and hollow capsules as drug carrier[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(24): 8 724-8 733.
- [29] 江万权,张复殿,陈祖耀,等. 羰基铁粉表面纳米钴修饰及其对磁流变液性能的影响[J]. *功能材料*, 2006, 37 (7):1 163-1 165.
- [30] 李剑锋,龚兴龙,张先舟,等. 硅橡胶基磁流变弹性体的研制[J]. *功能材料*, 2006, 37(6):1 003-1 005.
- [31] Gong X L, Zhang X Z, Zhang P Q. Fabrication and characterization of isotropic magnetorheological elastomers [J]. *Polymer Testing*, 2005, 24 (5): 669-676.
- [32] Wang Y L, Hu Y, Gong X L, et al. Preparation and properties of magnetorheological elastomers based on silicon rubber/polystyrene blend matrix[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, 103(5):3 143-3 149.
- [33] Wang Y L, Hu Y, Deng H X, et al. Magnetorheological elastomers based on isobutylene-isoprene rubber[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2006, 46(3):264-268.
- [34] 王银玲,胡源,付丽华,等. γ 射线辐照法制备硅橡胶基各向同性磁流变弹性体[J]. *功能材料*, 2006, 37(5): 771-773.
- [35] Wang Y L, Hu Y, Chen L, et al. Effects of rubber/magnetic particle interactions on the performance of magnetorheological elastomers[J]. *Polymer Testing*, 2006, 25(2): 262-267.
- [36] Gong X L, Chen L, Li J F. Study of utilizable magnetorheological elastomers[C]//Proceeding of the 10th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions. Reno: University of Nevada, 2006.
- [37] 江万权,朱春玲,陈祖耀,等. α -Fe 粉体浓悬浮体系的制备及磁流变效应[J]. *化学物理学报*, 2001, 14: 629-632.
- [38] 陈琳,龚兴龙,江万权,等. 增塑剂对磁流变弹性体磁流变效应的影响[J]. *功能材料*, 2006, 37(5): 703-705.
- [39] 龚兴龙,李剑锋,张先舟,等. 磁流变弹性体力学性能测量系统的建立[J]. *功能材料*, 2006, 37(5): 733-735.
- [40] 朱应顺,龚兴龙,张培强. 柱状和层状结构磁流变弹性体剪切模量的数值计算[J]. *功能材料*, 2006, 37(5): 720-722.
- [41] 方生,龚兴龙,张先舟,等. 磁流变弹性体力学性能的测试与分析[J]. *中国科学技术大学学报*, 2004, 34(4): 456-463.
- [42] 党辉,朱应顺,张培强,等. 基于分布链修正的磁流变弹性体的物理模型[J]. *化学物理学报*, 2005, 18(6): 971-975.
- [43] Zhang X Z, Li W H, Liu B, et al. An effective permeability model to predict field-dependent modulus of magnetorheological elastomers [C]//Proceeding of the Conference on Nonlinear Science and Complexity (NSC2006), Aug. , 2006, Beijing, China.
- [44] 邓华夏,龚兴龙,张培强,等. 刚度和阻尼均可控的减振器[P]. 发明专利申请号:200510038642. 1; 新型专利授权号:ZL 200520070319. 8, 2006.
- [45] 邓华夏,龚兴龙,张先舟,等. 磁流变弹性体移频式吸振器及控制方法[P]. 发明专利申请号:200510094882. 3; 新型专利授权号:ZL 200520076452. 4, 2006.
- [46] 孙红灵,龚兴龙,张赬,等. 磁流变弹性体主动吸振系统及控制方法[P]. 发明专利申请号:200510094987. 9; 新型专利授权号:ZL 2005 2 0076658. 7, 2007.
- [47] Deng H X, Gong X L, Wang L H. Development of an adaptive tuned vibration absorber with magnetorheological elastomer[J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15(5):N111-N116.
- [48] 邓华夏,龚兴龙,张培强. 磁流变弹性体调频吸振器的研制[J]. *功能材料*, 2006, 37(5): 790-792.
- [49] Sun H L, Zhang P Q, Gong X L, et al. A novel kind of active resonator absorber and the simulation on its control effort [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 300:117-125.