

特约专栏

刚柔并济——具有磁敏特性的粘弹性智能材料

余 淼

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 将磁性颗粒填充于粘弹性基体中可以制备得到具有磁控特性的粘弹性材料, 通过调节外加磁场可以对其物理性能(如力学、电学、光学、热学等性能)进行迅速、连续和可逆的控制。因此磁敏粘弹性材料在振动控制、传感器、声学降噪、电磁屏蔽等领域有着广阔的应用前景。综述了国内外包括磁流变弹性体、磁流变胶、磁流变塑性体等在内的多种磁敏粘弹性材料的研究进展。讨论了各类磁敏粘弹性材料的特点, 从材料制备、性能表征、应用研究等方面进行了介绍, 并就磁敏粘弹性材料未来的发展进行了展望。

关键词: 智能软材料; 粘弹性; 磁流变; 磁控特性; 磁流变弹性体; 减振降噪

中图分类号: O441.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2018)10-0791-12

“Couple Hardness with Softness”——Viscoelastic Smart Materials with Magnetic-Sensitive Characteristics

YU Miao

(Key Laboratory for Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The viscoelastic materials with magnetic-control properties can be prepared by filling the magnetic particles in the viscoelastic polymer matrix. By adjusting the applied magnetic field, the physical properties (such as mechanical, electrical, optical, thermal properties *et al.*) of it can be controlled rapidly, continuously and reversibly. Therefore, the magnetic-sensitive viscoelastic materials have a wide application prospect in the fields of vibration control, sensor, acoustic noise reduction and electromagnetic shielding. This paper reviews the domestic and foreign research progress of magnetic-sensitive viscoelastic materials, including magnetorheological elastomer, magnetorheological gel and magnetorheological plastomer. In this paper, the characteristics of all kinds of magnetic-sensitive viscoelastic materials are discussed, and the materials preparation, characterization and application research are introduced. Finally, the future development of magnetic-sensitive viscoelastic materials is prospected.

Key words: smart soft material; viscoelasticity; magnetorheological; magnetic-control properties; magnetorheological elastomer; vibration and noise reduction

1 前 言

20 世纪 80 年代, 人们基于仿生的构想提出了智能材料的概念, 赋予智能材料某些生命特征, 如能够感知外部环境, 实时地改变特性适应自身和环境变化, 甚至在出现损伤后可以自我修复^[1]。智能材料, 亦称机敏材

料, 是多种学科交叉的研究前沿, 是信息技术融入材料科学的自然产物。黄尚廉、陶宝琪、沈亚鹏等老一辈科学家率先在国内开展智能材料与智能结构的探索和研究^[2-4]。经过几十年的发展, 智能材料在世界范围内已成为材料科学与工程领域的研究热点^[5], 将成为未来信息智能社会最重要的物质基础之一。

具有磁敏特性的粘弹性智能材料是由磁流变液发展而来的, 简称磁敏粘弹性材料, 它将微米级的磁性颗粒复合到粘弹性聚合物基体中形成的智能材料, 不仅拥有粘弹性材料储能耗能兼备的特性, 并且可以通过外加磁场的强弱对其物理(如力学、电学、光学、声学、热学等)性能进行迅速、连续和可逆的控制^[6]。相比其它智

收稿日期: 2018-04-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775064); 装备预研教育部联合基金项目(6141A02022108)

作者简介: 余 淼, 男, 1973 年生, 教授, 博士生导师, Email: yumiao@cqu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2018.10.06

能材料,磁敏粘弹性材料具有磁致效应显著、响应速度快、力学强度高、加工成型简单等多种优势。此外,非接触式的空间磁场驱动方式扩展了它的应用领域,如生物医疗、机器人、航空航天等。

依据其成型后物理形态的不同,具有磁敏特性的粘弹性智能材料主要包括磁流变弹性体^[7]、磁流变胶^[8]和磁流变塑性体^[9]。它的磁敏特性来源于颗粒排列在外加磁场下的变化,不仅与颗粒之间的磁相互作用力相关,还受制于基体对颗粒的束缚。不同物理形态的基体对磁性颗粒的束缚力迥然相异,而磁性颗粒又会反作用于基体高分子链的形态,从而使得材料表现出千差万别的磁敏粘弹特性。

由于磁敏粘弹性材料具有良好的环境适应性和优异的磁控特性,目前已经在减振降噪、传感、微流控、电磁吸波等领域取得了重大突破和丰硕成果。本文将分别介绍磁流变弹性体、磁流变胶和磁流变塑性体等多种磁敏粘弹性材料的研究进展,归纳研究和应用中存在的问题,并就其发展趋势进行展望。

2 磁致粘弹性材料概述

2.1 磁流变弹性体

磁流变弹性体(magnetorheological elastomer, MRE)是磁敏粘弹性材料家族中最重要成员,主要由微米级磁性颗粒、弹性基体和添加剂组成。MRE 的磁敏特性主要表现为通过外加磁场来改变材料的储能模量及损耗因子等力学性能。此外,基于磁性颗粒在磁场下的磁致相互作用, MRE 的电学、热学、光学等特性同样可以产生迅速、可逆的磁控变化^[6]。

由于基体上的巨大差异, MRE 的磁致流变学机理跟其前辈——磁流变液(magnetorheological fluid, MRF)有明显区别。在磁场作用下, MRF 的磁性颗粒能够在基体中自由移动并形成与磁场方向平行的链状或柱状结构,使 MRF 表现出明显的相变特性。而 MRE 的磁性颗粒在成型后则是束缚在固态的高分子基体中,在磁场作用下颗粒聚集结构不会发生明显变化,只会产生磁性颗粒的微小转动和偏移^[10, 11]。随着磁场强度的增大,颗粒之间、颗粒与基体之间的相互作用力会增强,宏观上表现为更高的刚性而非产生相变现象。此外,从工作状态上区分, MRF 主要是工作在材料屈服后和流动阶段,磁性颗粒在 MRF 中的链状结构可以重复破坏和重构。而 MRE 中的磁性颗粒被固态基体所束缚,其链状结构在被破坏后无法自主修复,因此它通常工作在材料屈服前的状态。

Shiga 等^[12]于 1995 年使用硅树脂和铁粉混合制备出

的磁致粘弹性凝胶一般被认为是 MRE 的雏形。此后经过 20 年的发展, MRE 已经逐步形成了以材料制备、测试表征、机理研究和器件应用为 4 大主体的研究系统。本节将从这 4 个方面对 MRE 的研究进展进行介绍。

2.1.1 磁流变弹性体的材料研制

在 MRE 的制备过程中,可以通过磁场对其颗粒分布进行调节。图 1 所示为无场制备的各向同性 MRE 和有场制备的各向异性 MRE 的 SEM 照片。通过在预结构化时施加磁场,有场制备的 MRE 内部沿磁力线方向形成了明显的链状结构^[13]。

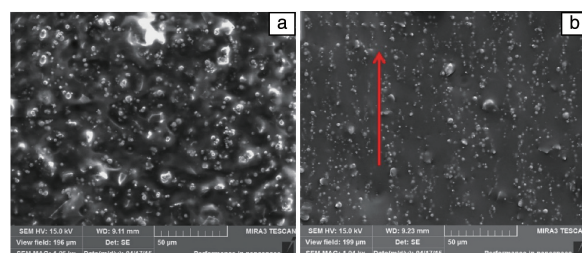


图 1 各向同性(a)和各向异性(b)磁流变弹性体的 SEM 照片^[13]

Fig. 1 SEM images of the isotropy(a) and anisotropy(b) of MRE^[13]

为了提高 MRE 的性能,研究者在材料选择和改性方面进行了大量探索。基体作为复合材料中的连续相,通过界面将增强颗粒粘接为一个整体,并以剪切力的形式向增强颗粒传递载荷。MRE 的机械强度、玻璃化转变温度、耐热性等性能都与基体息息相关。在 MRE 基体的选择上,研究者通常选用较为柔软的橡胶弹性体材料,如硅橡胶^[14-17]、天然橡胶^[18]、聚氨酯^[19-21]、顺丁橡胶^[22, 23]、PDMS^[24]、聚氨酯/环氧树脂互穿网络基体^[25]、多种橡胶混合基体^[26, 27]等。Ubaidillah 等^[6]对 MRE 的基体种类进行了分析,如图 2 所示,硅橡胶占据了 MRE 的半壁江山,其主要原因是由于硅橡胶的制备工艺简单,零场模量低,确保了 MRE 获得较高的磁流变效应。

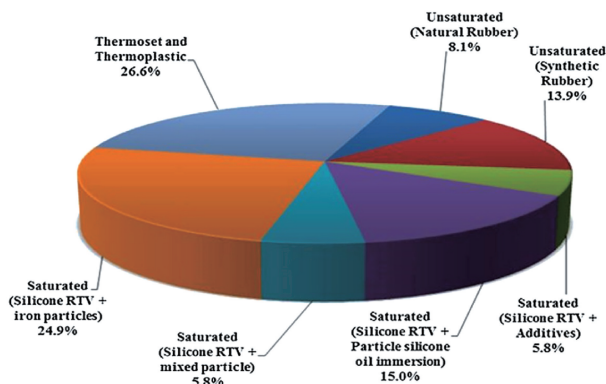


图 2 磁流变弹性体基体的种类分布图^[6]

Fig. 2 Type distribution of matrix material of MREs^[6]

磁性颗粒是 MRE 材料获得磁致特性的关键, 为了更好地适应工程应用需求, 磁性颗粒的选择尤为重要。羰基铁粉具有高饱和磁化强度和低矫顽力, 是制备 MRE 的理想选择^[28]。另外镍钴粉和一些硬磁颗粒粉如钕铁氧体、锶铁氧体、钕铁硼等也被用作 MRE 的磁性颗粒^[29-32]。作者课题组利用硬磁颗粒制备的 MRE 在充磁后具有剩磁, 通过其退充磁特性实现 MRE 的双向磁致模量特性。当施加与样品充磁方向相反的磁场时, MRE 储能模量随磁场增大而减小, 当施加与样品充磁方向相同的磁场时, 储能模量随磁场增大而急剧增大^[33]。

Padalka 等分别制备了以 Fe, Co, Ni 纳米线为软磁填充颗粒的 MRE, 实验发现 MRE 的磁致特性与颗粒的磁学特性有很大关系。其中利用 Fe 纳米线制备的 MRE 磁流变效应最高, 而 Ni 纳米线制备的样品磁流变效应最差^[29]。此外, 颗粒的形貌和粒径对 MRE 的影响也很大, 作者课题组制备了含有球形和花状纳米片包覆羰基铁粉的 MRE, 提高了样品的磁流变效应和阻尼特性^[34]。Li 等制备了含有 2 种不同粒径羰基铁粉的 MRE, 发现不同粒径的磁性颗粒共混能够使材料获得更大的磁流变效应^[35]。Ubaidillah 等还统计了目前制备 MRE 所用磁性颗粒的形状和粒径分布图, 发现目前大部分研究者采用的多为粒径在 0~10 μm 的球形磁性颗粒^[6]。

MRE 的磁性颗粒和基体极性相差较大, 其界面强度较弱制约了力学强度的提升。特别是为了获得高磁流变效应, 研究者往往需要提升磁性颗粒的体积分数, 从而导致了更严重的团聚问题和界面缺陷。在 MRE 界面改性研究方面, Qiao 等通过钛酸酯偶联剂对羰基铁粉(CIP)的表面特性进行了改性, 提高了颗粒与 SEEPS 基体之间的结合, 明显提升了 MRE 的磁流变效应^[36]。Jiang 等利用 Span80 对 CIP 表面进行了修饰, 提高了 MRE 的相对磁流变效应^[37]。Wang 等利用硅烷偶联剂对 CIP 表面进行改性, 结果显示表面修饰能够提高颗粒在基体中的分散特性^[38]。Behrooz 等则利用表面包覆手段提高了 MRE 的耐腐蚀性^[39]。作者课题组利用四甲氧基硅烷和聚苯胺分别对羰基铁粉进行了包覆, 提高了 MRE 的磁流变效应, 并降低了 MRE 的佩恩效应^[40, 41]。通过界面修饰不仅减少了界面缺陷, 同时还改善了颗粒的团聚现象。事实上, MRE 在预结构过程中形成的链状结构是另一种有序的颗粒团聚现象, 同样会影响 MRE 的材料强度, 因此界面改性和合理的预结构方法对于 MRE 的力学特性至关重要。

此外, 改进的添加剂或增强颗粒也是提高 MRE 磁致力学特性的有效手段之一。目前采用的补强剂有碳化硅颗粒^[42, 43]、纳米四氧化三铁^[44]、炭黑^[45]、碳纳米管^[46]等。从 MRE 材料研制的整体上来看, 目前制备的材料往往不

能同时兼顾力学强度和磁流变效应, 较低的磁流变效应或机械强度限制了 MRE 的工程应用。磁流变效应不应作为 MRE 唯一的评价指标, 针对特定的应用背景, 制备出综合性能满足要求的 MRE 材料应成为未来主要研究方向。

2.1.2 磁流变弹性体的测试表征

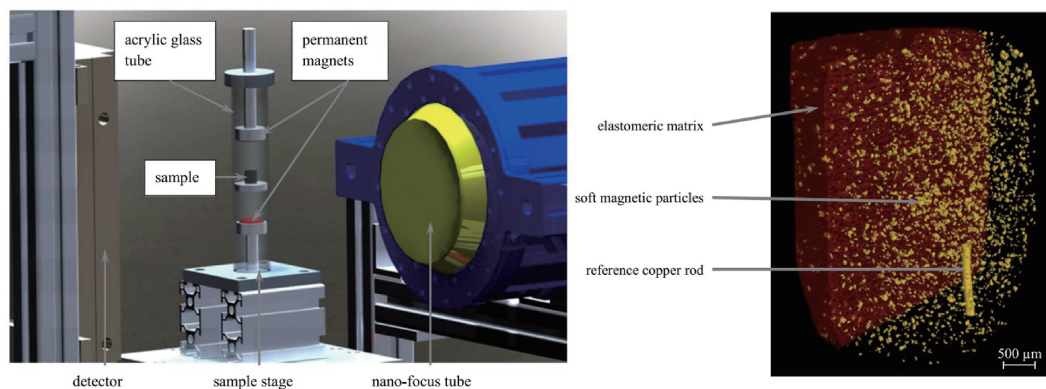
MRE 的磁控力学特性是研究最为广泛的磁致特性, 目前国内外研究课题组采用较多的仪器为安东帕公司的磁流变仪, 该仪器配备有磁流变模块, 可以实现 MRE 在不同磁场强度下的振荡剪切测试^[47-49]。此外, 龚兴龙课题组在传统的动态机械分析仪(DMA)上配备电磁铁实现了 MRE 动态力学特性的测试^[43]。

Kallio 和 Koo 等研究了 MRE 的动态压缩力学性能, 研究了应变幅值和频率对 MRE 的动态压缩力学性能的影响^[50, 51]。MRE 作为一种典型的粘弹性材料, 其静态粘弹性表现出明显的磁场依赖性。作者课题组对 MRE 的蠕变回复和应力松弛特性进行了系统的研究, 发现磁场会降低 MRE 的蠕变, 同时还会限制其回复及应力松弛^[13, 52]。作者课题组还对压缩模式下的材料磁响应特性进行了测试和分析, 该结果可以为 MRE 器件的控制优化提供指导^[53]。

为了更好地推动 MRE 进入实际工程应用, 稳定性作为一项重要的性能指标逐渐被研究者所重视。为此研究者们利用热重分析(TGA)和差示扫描量热法(DSC)对其耐热性进行了研究^[25, 54]。此外, MRE 的疲劳性也受到了越来越多的关注^[18, 43, 55]。

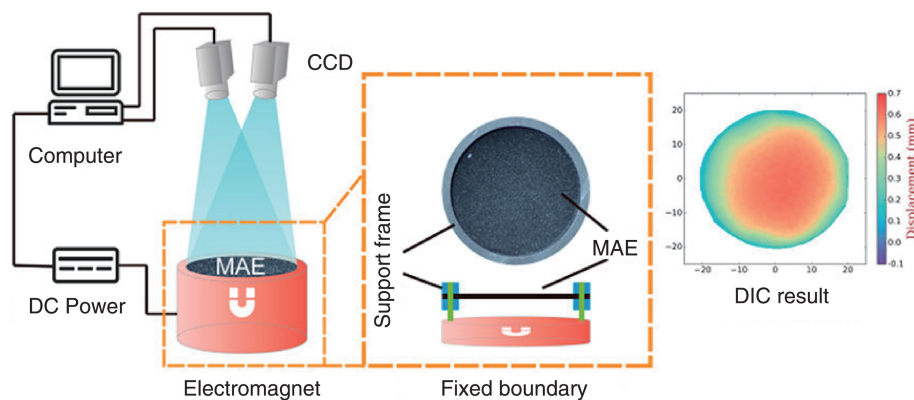
在 MRE 的微观结构表征方面, 常用的手段为扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、原子力显微镜(AFM)和数字全息干涉技术等。计算机断层扫描技术能够对材料内部三维结构进行重构, 越来越多的研究者利用该方法对 MRE 内部颗粒的分布和运动行为展开了研究^[56-58], 如图 3 所示。

MRE 的基体材料不导电, 但是其铁磁颗粒的导电性却比基体高几个数量级。各向异性 MRE 内部独特的链状结构能够形成导电通路, 给 MRE 带来独特的电学特性。Tian 等将石墨烯掺杂到 MRE 中, 发现掺杂有石墨烯的 MRE 在施加磁场时, 电阻会发生变化^[59]。Bica 通过在 MRE 中添加石墨烯颗粒制备了导电 MRE, 并研究了磁场和压力对其电导率的影响^[60]。Fan 等最近研究了磁敏弹性体的压容压阻效应, 结果显示其电学特性跟内部颗粒结构及压缩荷载有关^[61]。此外龚兴龙课题组对导电 MRE 进行了深入研究, 利用海绵制备了对应变敏感的导电 MRE^[62], 并研究了 MRE 在疲劳荷载下的阻抗特性和动态力学特性的耦合关系^[63]。以上研究彰显了导电 MRE 在传感领域的应用前景。

图 3 Xμ-CT 测试系统及磁流变弹性体断层扫描照片^[10]Fig. 3 Experimental setup of Xμ-CT and the tomogram of MRE sample^[10]

MRE 的磁性颗粒在磁场下会产生相互作用力, 由于磁性颗粒与弹性基体之间的耦合作用, MRE 在磁场下会发生明显的形变。Martin 等在 2004 年就研究了 MRE 的磁致伸缩特性, 利用光学方法测得 MRE 的最大收缩形变达到 10^{-2} ^[64, 65]。Guan 等利用应变片对柱状 MRE 的磁致伸缩特性进行了测试, 测试结果显示其伸缩效应为 1.84×10^{-4} ^[66]。龚兴龙课题组使用数字全息干涉技术分析了 MRE 表面在磁场下的二维形变, 观察到

MRE 表面同时存在收缩变形和拉伸变形, 形变状态主要跟 MRE 的颗粒分布状态有关^[67]。作者课题组利用激光位移传感器对 MRE 薄膜的磁致形变和响应时间进行了研究, 发现其响应时间在 50 ms 以内^[68]。最近 Feng 等分别采用激光多普勒测速仪和数字图像处理方法对 MRE 薄膜的磁致形变进行了研究, 图 4 为数字图像处理方法的系统示意图及测试结果^[69]。

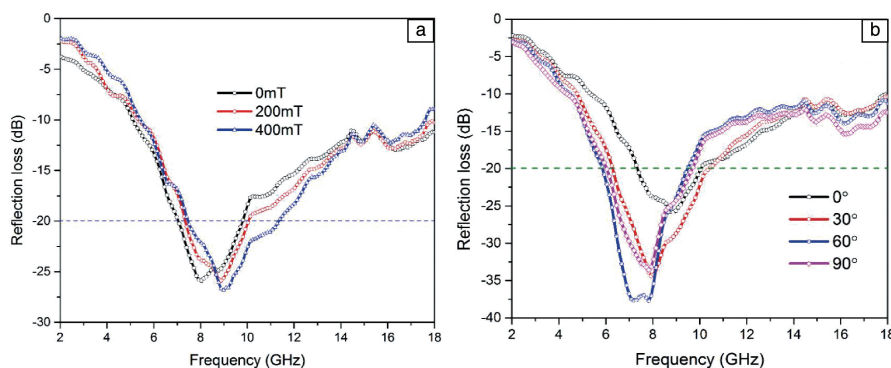
图 4 数字图像处理方法的系统示意图及测试结果^[69]Fig. 4 Schematic illustration of digital image correlation (DIC) method and the DIC testing result^[69]

除了上述性能之外, 研究者发现 MRE 在光学、热学、声学 and 电磁屏蔽方面也具有独特的磁控特性。Zhang 等利用纳米 Fe_3O_4 颗粒掺杂到 PDMS 基体中制备出薄膜 MRE, 发现该 MRE 在磁场强度约为 80 mT 时透光性相比零场时下降约 8.61%, 其中各向异性 MRE 比各向同性 MRE 透光性更好^[70]。该研究作为 MRE 作为磁控元件开发磁控光学器件提供了可能。Wu 等测试了聚氨酯 MRE 的导热特性, 发现各向异性 MRE 的热导率高于各向同性 MRE, 其原因是内部的颗粒链状结构能够作为导热通道提高 MRE 的热导率^[71]。Chen 等研究了 MRE 在不

同磁场下的声学特性, 发现其共振频率随磁场增大而增大^[72]。Faramarz 和 Xu 等还对由 MRE 构成的声子晶体的可调谐带隙特性进行了研究^[73-76]。作者课题组研究了 MRE 的电磁波吸收特性, 发现 MRE 的吸波特性和磁场强度和 MRE 内部链状结构的间距和角度密切相关, 如图 5 所示^[77]。MRE 的测试表征是应用的基础, 借助各类先进仪器对 MRE 磁控特性进行横向和纵向的发掘是推动 MRE 研究发展的必由之路。

2.1.3 磁流变弹性体的机理研究

目前关于 MRE 磁敏机理的研究主要包含微观磁敏机

图 5 不同磁场强度(a)和不同磁场角度(b)下 MRE 的反射损耗曲线^[77]Fig. 5 Reflection loss curves of MRE under different magnetic field intensity (a) and magnetic field angle (b)^[77]

理和宏观磁敏机理 2 个方面。其中 MRE 微观理论模型一般将颗粒简化成磁偶极子, 通过计算颗粒相互作用能的变化, 得到 MRE 在磁场下的磁致模量。其中最具代表性的分别是 Lord 公司 Jolly 建立的偶极子模型^[78]和 Shen 提出的耦合场模型^[79]。为了提高偶极子模型的精确性, 诸多研究者在计算模型中引入了更多的影响因素^[35, 78, 80]。其中作者课题组研究认为 MRE 内部颗粒链与外加磁场存在一定的夹角, 因此基于 MRE 的链化模型引入了斜链夹角的正态分布, 分析了 MRE 磁致效应的机理^[81]。Chen 等建立了有限柱长模型, 对 MRE 在剪切模式下的磁控特性进行了预测^[82]。基于 MRE 内部颗粒的分布特征, 索思等提出了基于卡方分布的磁偶极子模型, 给出了 MRE 磁致模量的计算公式^[83]。磁偶极子模型忽略了颗粒和基体作用力对 MRE 粘弹性的影响, 许多学者基于磁弹性理论, 通过引入磁弹性应变能密度函数来描述 MRE 内部机械能和磁场能的耦合关系, 提出了 MRE 粘弹性的本构模型。这类模型可以反映基体与铁磁颗粒间的相互作用对 MRE 粘弹性的影响。Dorfmann 等根据 Cauchy 应力不变量理论, 将 MRE 视为超弹性材料并忽略 MRE 内部的电极化强度, 利用连续介质理论推导了各向同性 MRE 的本构方程, 得到了 MRE 在不同磁场方向、不同变形条件下应力与外加磁场的关系^[84-86]。Borcea 等利用最小势能原理建立了各向同性 MRE 的全面模型, 得到了各向同性 MRE 的应力与应变之间的关系^[87]。Rudykh 等基于有限形变推导出 MRE 宏观不稳定的发生条件, 将 MRE 内部链状结构看成是多层的微观结构, 建立了精确的力学模型来描述 MRE 刚度与外加磁场的关系^[88]。Danas 等基于 MRE 有限应变的理论基础提出了横向各向同性的能量密度函数, 该方程可以描述不同预载荷、不同颗粒链方向以及不同外加磁场时 MRE 的力学特性^[89]。Sun 等提出了基于代表体积分元 (representative volume element, RVE) 的唯象模型,

该模型可以表征不同加载条件下各向异性 MRE 的力学特性^[90, 91]。

微观磁敏机理往往建立在一定的理想条件上, 而实际上颗粒的粒径大小、分布状态、界面结构、基体特性等都会对磁致特性产生影响。目前缺乏统一的微观磁敏机理来完美地描述 MRE 的磁致特性。就实际应用而言, 宏观力学模型的建立更具实际应用价值。目前关于 MRE 的宏观力学模型主要是从传统的粘弹性参数化和非参数化的宏观模型上引入磁致参量, 通过引入具有磁控参数的弹簧、粘壶等元件来描述 MRE 的粘弹特性。

Li 等建立了表征 MRE 在动态加载条件下特性的四参数模型, 通过实验数据拟合得到了各参数的值并进行了讨论^[92], 另外还对 MRE 的蠕变特性进行了研究, 采用一个四参数模型对 MRE 的蠕变特性进行了讨论^[93]。Norouzi 等提出了一种改进的 Kelvin-Voigt 粘弹性模型, 该模型可以描述 MRE 在一定激励条件下的应力-应变关系, 而且模型的参数不随外加负载及外加磁场变化而变化^[94]。Xin 等根据 MRE 的微观结构及宏观力学测试结果, 提出了一种兼顾 MRE 的传统粘弹性和磁敏粘弹性的模型, 该模型能同时描述 MRE 的粘弹性与应变、频率以及磁场之间的关系^[95]。最近 Cantera 等对 MRE 磁敏特性的机理模型研究进行了详细的综述, 从颗粒相互作用机理、磁弹性理论、磁粘弹性理论、唯象模型等方面对 MRE 的理论模型研究进行了一个分类^[96]。他们认为未来研究中需要对 MRE 在长时间下的特性 (蠕变、应力松弛、疲劳、耐久等) 进行理论模型研究, 这些有助于推动 MRE 的实际工程应用。

2.1.4 磁流变弹性体的应用研究

在 MRE 的应用研究方面, 首先基于 MRE 优良的磁控力学特性, 研究者们设计开发了众多智能减振器件, 在土木、汽车、精密加工等应用领域取得了众多应用成果^[97-103]。国内多家课题组在推动 MRE 在振动控制领域

的应用方面做出了重要贡献^[104-116]。图 6 为典型的叠层式 MRE 横向隔振器及其磁控移频曲线图。

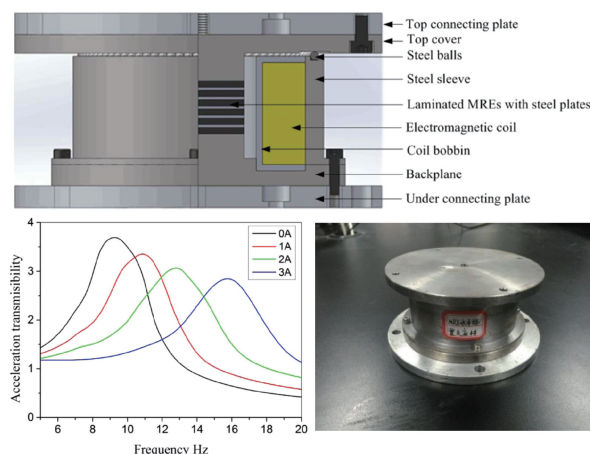


图 6 叠层式 MRE 隔振器的结构示意图、移频曲线及实物图^[116]

Fig. 6 Schematic structure, amplitude-frequency characteristic and prototype of laminated-MRE isolation bearing^[116]

针对精密加工或测量平台系统中在工作中存在的微振动问题,作者课题组针对 MRE 微振动隔振系统的复杂非

线性问题,提出了半主动模糊控制方法,并设计了不依赖于系统模型的模糊控制器。此外,还利用非参数化的自回归神经网络方法对 MRE 隔振器进行建模^[117, 118]。

除了智能减振应用,近年来基于 MRE 磁致形变、磁控电学、磁控光学等特性的应用器件层出不穷。例如基于 MRE 优异的磁致形变特性,研究者们开发了一系列磁控柔性作动装置,在软体机器人、传感器、微流控等领域开展了一系列应用研究^[119-122]。最近 Li 等报道一种基于 MRE 磁致形变设计的微流控系统,成功地利用磁场实现了微流系统的流体控制^[123]。Schmauch 等针对 MRE 面向软体机器人的应用,制备了各向异性的弹性体膜,并制作了多种柔性致动器^[124]。龚兴龙课题组利用 MRE 与聚偏二氟乙烯(PVDF)制备了磁致复合膜,并利用该复合膜制作了小型柔性爪,通过磁场控制实现了对小型物品的抓取和释放。他们还研究了在作动过程中致动器的感应电荷变化,对形变的实时反馈监测进行了初步尝试^[122]。最近 Hu 等报道了一种利用硅橡胶和钕铁硼颗粒制备的小型软体机器人,如图 7 所示,通过设计相应的时变磁场实现了该软体机器人的爬行、抓取、跳跃等一系列动作,在医学应用中具有可观的应用前景^[125]。

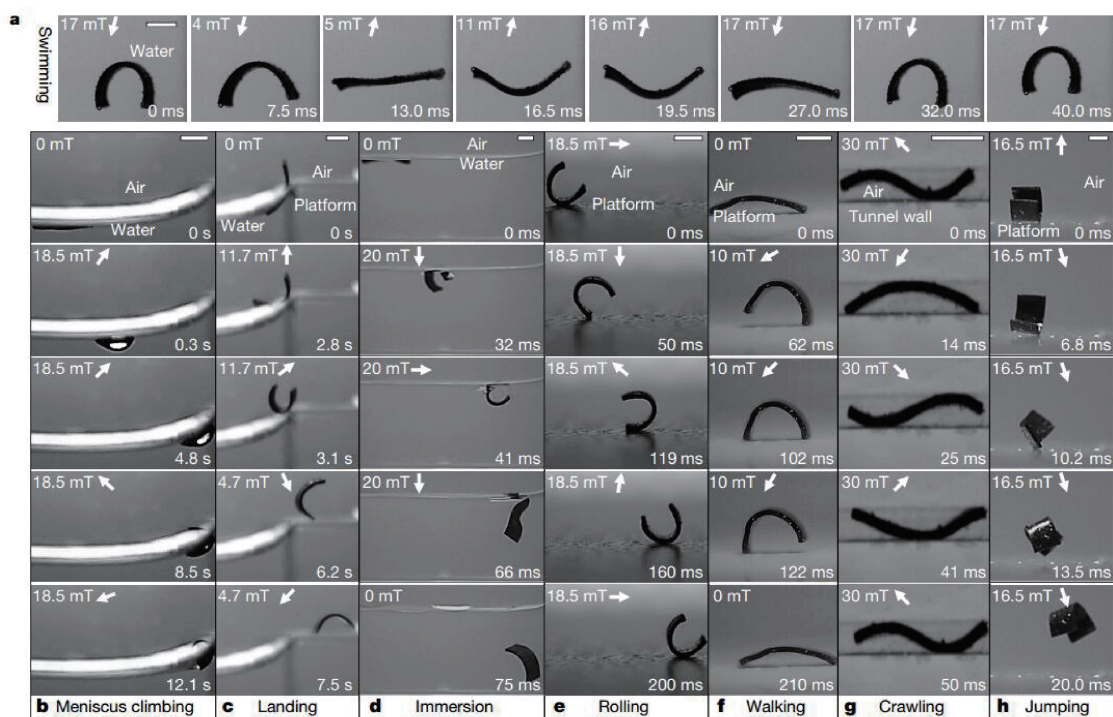
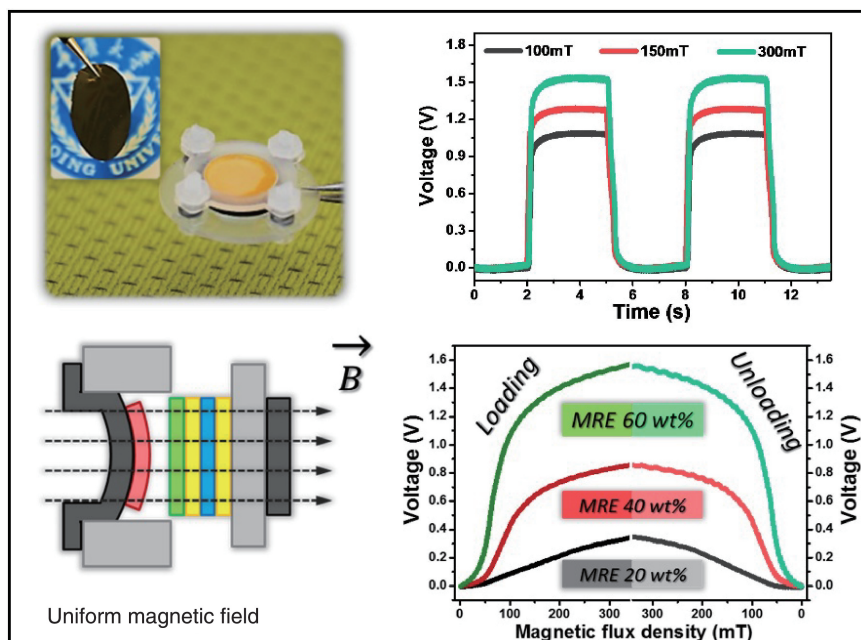


图 7 Hu 等设计的软体机器人的各类作动行为^[125]

Fig. 7 Different kinds of actuating behavior of soft robot designed by Hu *et al.*^[125]

作者课题组制备了 MRE 薄膜材料,利用该 MRE 薄膜灵敏的磁致形变特性,将其与摩擦纳米发电机相结合,

设计制作了具有自供能特点的磁场传感器。如图 8 所示,该传感器能够实现在无源条件下对匀强磁场的监测^[68]。

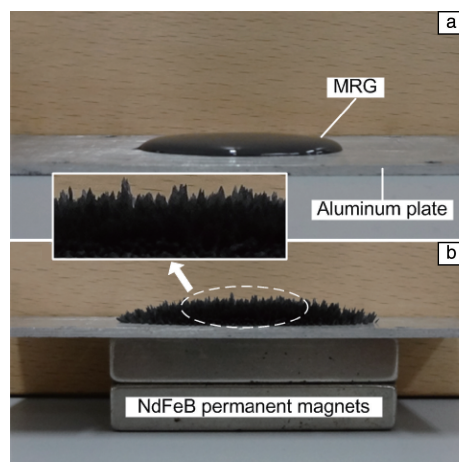
图 8 基于磁流变弹性体薄膜的自供能磁场传感器及其电学响应特性^[68]Fig. 8 Self-power magnetic-field sensor based on MRE film and its electrical response characteristics^[68]

另外基于 MRE 的磁致电学特性, Bica 采用含导电石墨片的 MRE 制备了 MRE 传感器^[126]。电学特性是近期 MRE 研究的热点, 基于其电学特性开发传感器件将成为 MRE 应用研究的重要分支。

2.2 磁流变胶

磁流变胶 (magnetorheological gel, MRG) 是一种为克服磁流变液的颗粒沉降问题而开发的磁敏粘弹性材料。其基体是介于流体和弹性体之间的凝胶状聚合物, 颗粒在高粘度的聚合物基体中具有非常高的稳定性。粘性基体和稳定的颗粒赋予了 MRG 诸多优点, 如大阻尼、高磁流变效应、抗沉降等。由于凝胶状的基体对颗粒的束缚相对较弱, 因此 MRG 的颗粒在磁场作用下能够瞬间形成颗粒链状结构, 使得 MRG 的表面呈簇状类固体形态, 如图 9 所示^[127]。

目前关于 MRG 的研究主要集中在材料制备及性能表征上, 其应用领域还有待挖掘。在 MRG 的材料制备方面, Zrínyi 研究组利用聚乙烯醇和聚 N-异丙基丙烯酰胺水凝胶作为基体, 制备了 MRG^[128-131]。来自日本的 Mitsumata 等制备了琼脂和卡拉胶混合基的 MRG, 并研究了该 MRG 的巨磁流变效应^[132-134]。Wilson 等制备了有机硅聚合物凝胶基和聚氨酯基 MRG, 他们通过调节基体的交联度和增塑剂, 可使得 MRG 在液态跟固态之间转变^[135]。聚氨酯由于具有制备工艺简单、基体粘度可调等优点受到了众多研究者的青睐。例如 Wei 等通过改变聚氨酯基体中软硬段比例来控制 MRG 材料的动态和静态剪切屈服

图 9 磁流变胶在零场(a)与磁场(b)下的形态照片^[127]Fig. 9 Morphological images of MRG under the absent (a) and present (b) magnetic field^[127]

应力^[136]。作者课题组制备了聚氨酯基 MRG, 此外还通过添加镀镍碳纳米管、树枝状和花状羰基铁粉提高了 MRG 的磁控力学特性^[137, 138]。结果表明掺杂不同形貌的磁性颗粒, 可以提升 MRG 的磁敏特性。

在 MRG 性能表征方面, Raikher 研究组制备了粘弹性铁凝胶, 并对其动态磁导率^[139]、线性取向动力学性质^[140]、磁致变形效应^[141, 142]等性能进行了表征。Zubarev 分析了 MRG 的磁致变形行为, 并基于颗粒链结构对其磁致变形的影响机理进行了讨论^[143, 144]。此外, An 等研究了不同种类的 MRG 在磁场作用下独特的动态力学特性,

如硬化增强特性^[145]、非线性流变行为^[146]、长时间响应特性^[147]，还直接观察了颗粒在循环应力硬化效应下的重新排列^[148]，同时研究了颗粒链结构的变化过程^[149]。龚兴龙课题组对 MRG 在循环剪切下的磁致流变特性进行了研究，发现磁场是 MRG 在应力软化和应力硬化之间转变的重要因素，其根源是微观颗粒结构的演化^[150]。作者课题组从颗粒微观结构的变化角度对 MRG 的正应力进行了分析^[151]。

MRG 的磁控电学特性也是研究热点。由图 10 可知，MRG 的磁性颗粒可以在磁场作用下逐渐形成有序的链状结构，响应时间和链状结构的强弱与基体粘度和磁场有关。作者课题组对 MRG 的磁控电阻特性进行了系统的研究^[152]，发现 MRG 内部导电通路的形成可以使得 MRG 的电阻急剧下降。此外，还通过在 MRG 中添加碳纳米管大幅提升了 MRG 的磁控导电特性^[153]，在传感器和磁控电子元件方面具有良好的应用前景。

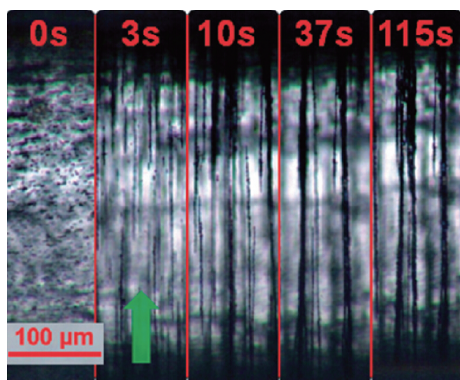


图 10 MRG 在磁场下颗粒分布随时间变化

Fig. 10 Particles distribution of MRG under magnetic field

另外一方面，Li 等对磁性水凝胶的材料与应用进行了分析，并对其潜在的生物医学应用进行了介绍^[154]，比如药物运输释放、酶固定、癌症治疗、柔性致动器等^[155-158]。总的来看，MRG 的研究还处于起步阶段，许多科学问题尚未得到解决。为实现 MRG 在大功率阻尼器、磁控传感器、生物医学等方面的工程应用，还需要从材料制备、机理研究等方面进行探索。此外，还应该积极开拓 MRG 的各种磁控物理性能（热学、光学等）研究，寻求突破并拓宽其应用领域。

2.3 磁流变塑性体

磁流变塑性体(magnetorheological plastomer, MRP)是龚兴龙课题组在 2011 年报道的高性能磁敏智能软材料^[9]。提高 MRG 的基体交联度，可以获得类固态的 MRP。其基体为可塑性屈服流动的聚氨酯基体，在加入铁磁颗粒后，其表现为类似橡皮泥的性状，其实物照片及 SEM 照片如图 11 所示。

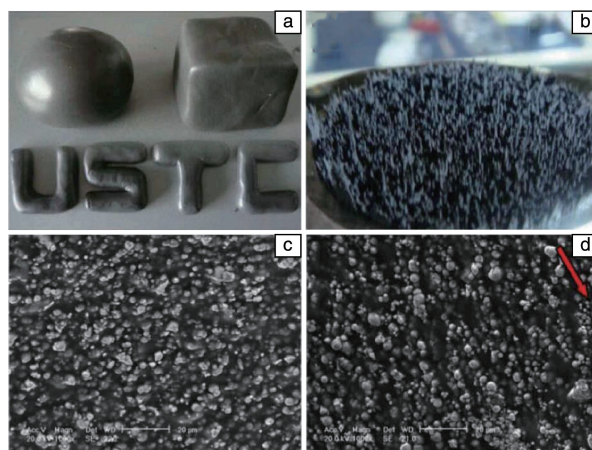


图 11 磁流变塑性体在零场(a, c)和磁场(b, d)下的实物和 SEM 照片^[159]

Fig. 11 The photograph and SEM images of MRP in the absent (a, c) and present (b, d) magnetic field^[159]

与 MRG 类似，目前关于 MRP 的研究主要同样处于基础材料研究阶段。与 MRG 的磁流变效应一样，在磁场作用下，MRP 的颗粒同样会形成有序的链状结构。然而由于基体的交联度更高，MRP 基体对颗粒的束缚力远强于 MRG。因此当磁场撤去后取向排列的颗粒链可以继续保留在基体中，这种独特的特征赋予了 MRP 更为独特的磁流变特性：在保证较低初始模量的情况下可以获得与 MRE 同数量级的磁致模量，具有非常高的磁流变效应^[9]。其颗粒移动同时受制于磁场及基体，具有丰富的颗粒结构变化特点，对于磁流变材料的机理研究及其在更大范围内的应用都具有重要的意义^[160]。

自提出 MRP 的概念以来，龚兴龙课题组系统地研究了其蠕变回复^[161]、挤压流变^[162]、正应力^[163]、非线性流变特性^[164]、导电特性^[165, 166]、形变及阻尼^[167]等特性。另一方面，研究者们通过选择合适的基体材料，还研发出了与 MRP 类似的类固态磁流变材料，有些将其命名为磁流变橡皮泥。例如 Xuan 等基于石蜡与凡士林混合基体的温度相变特性，研制了一种可在 MRP 和磁流变液之间相互转化的相变磁流变材料^[168]。类似的，Shahrivar 等将温敏聚合物作为磁流变材料的基体，制备了一种能够在 MRF 和 MRE 之间转变的相变磁流变材料，通过温度可以实现对该材料的固-液态转变^[169]。Golinelli 和 Guo 等利用聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为基体制备了磁流变橡皮泥，并对其静态和动态力学特性进行了研究^[170]。Wang 等不仅对其磁致粘弹性进行研究，还发现该材料兼具剪切硬化特性和磁致形变特性^[171]，图 12 所示为该材料在磁场下的形变响应图。

严格意义上看，MRG 和 MRP 并无明显的界限。两者都是研究者为了突破传统磁流变材料缺点而研发出来的新型

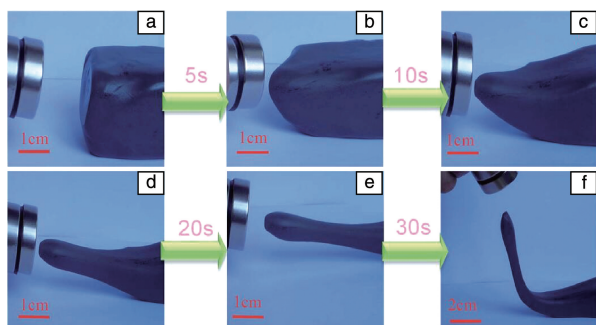


图 12 磁流变橡皮泥在磁场下的形变响应图^[171]

Fig. 12 Deformation response of magnetorheological silly putty in magnetic field^[171]

磁敏粘弹性材料。尽管关于 MRP 的应用研究较少，但是 MRP 具有无需密封、自愈合等独特的优点，在柔性致动器、传感器、医学仿生等方面具有良好的应用前景。

3 结 语

各类新型磁敏粘弹性材料的涌现有力地推动了智能材料的发展，为磁控智能器件的设计开拓了更广阔的空间，也为解决工程应用难题提供了新思路。虽然目前关于磁敏粘弹性材料的研究取得了一些突破，但是想要实现工程应用推广，还存在着不少亟待解决的理论和和技术问题。首先是磁敏粘弹性材料在低磁场下的磁致性能仍然有待提高，需要在兼顾静力学特性和磁致效应的同时，提高材料的耐久性、耐候性等长时间尺度下的稳定性；其次磁敏粘弹性材料的材料研究与器件研究大多数处于割裂状态，面向具体的应用对象和环境，对材料特性和器件参数进行协调和优化，是推动其工程应用的关键；最后磁敏粘弹性材料在光学、热学、声学 and 电磁屏蔽等领域具有巨大的应用前景，相关研究工作刚刚起步，材料制备及器件设计还有待深入。综上所述，磁敏粘弹性材料是一个集材料、物理、信息等多个学科交叉的研究方向，为了早日实现磁敏粘弹性材料的大规模工程应用，需要各领域的研究者联合探索。

参考文献 References

- [1] Huang Shanglian (黄尚廉). *World Science and Technology Research and Development*(世界科技研究与发展)[J], 1996, (3): 61–64.
- [2] Huang Shanglian (黄尚廉). *Research and Development*(软件工程)[J], 1997, (5): 7–9.
- [3] Huang Shanglian (黄尚廉), Tao Baoqi (陶宝祺), Shen Yapeng (沈亚鹏). *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2000, 11(1): 32–34.
- [4] Huang Shanglian (黄尚廉). *Piezoelectrics & Acoustooptics*(压电与声光)[J], 1993, 1: 13–15.

- [5] Zhang Xinmin (张新民). *Fiber Reinforced*(玻璃钢/复合材料)[J], 2013, 6: 57–63.
- [6] Ubaidillah J, Sutrisno A, Purwanto S A, et al. *Advanced Engineering Materials*[J], 2015, 17(5): 563–597.
- [7] Ginder J M, Nichols M E, Elie L D, et al. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*[J], 1999, 3675: 131–138.
- [8] Wilson M J, Fuchs A, Gordaninejad F. *Journal of Applied Polymer Science*[J], 2002, 84(14): 2733–2742.
- [9] Xu Y G, Gong X L, Xuan S H, et al. *Soft Matter*[J], 2011, 7(11): 5246–5254.
- [10] Gundermann T, Odenbach S. *Smart Materials and Structures*[J], 2014, 23(10): 105013.
- [11] Schümann M, Borin D, Huang S, et al. *Smart Materials and Structures*[J], 2017, 26(9): 095018.
- [12] Shiga T, Okada A, Kurauchi T, et al. *Journal of Applied Polymer Science*[J], 1995, 58(4): 787–792.
- [13] Qi S, Yu M, Fu J, et al. *Smart Materials and Structures*[J], 2016, 25(1): 015020.
- [14] Yu M, Fu J, Ju B X, et al. *Smart Materials and Structures*[J], 2013, 22(12): 125010.
- [15] Agirre-Olabide I, Elejabarrieta M J, Bou-Ali M M, et al. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*[J], 2015, 26(14): 1880–1886.
- [16] Kimura T, Umehara Y, Kimura F. *Soft Matter*[J], 2012, 8(23): 6206–6209.
- [17] Hu Y, Wang Y L, Gong X L, et al. *Polymer testing*[J], 2005, 24(3): 324–329.
- [18] Lokander M, Reitberger T, Stenberg B. *Polymer Degradation and Stability*[J], 2004, 86(3): 467–471.
- [19] Ju B X, Yu M, Fu J, et al. *Study on the properties of porous magnetorheological elastomers under shock effect*[C]. UK: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2013, 412(1): 012039.
- [20] Slawinski G, Miedzinska D, Niezgoda T, et al. *Environmental Degradation of Engineering & Materials Engineering and Technologies*[J], 2012, 183: 163–168.
- [21] Wei B, Gong X L, Jiang W Q, et al. *Journal of Applied Polymer Science*[J], 2010, 116(2): 771–778.
- [22] Sun T L, Gong X L, Jiang W Q, et al. *Polymer Testing*[J], 2008, 27(4): 520–526.
- [23] Zhang W, Gong X L, Sun T L, et al. *Chinese Journal of Chemical Physics*[J], 2010, 23(2): 226–230.
- [24] Li W H, Nakano M. *Smart Materials and Structures*[J], 2013, 22(5): 055035.
- [25] Yu M, Qi S, Fu J, et al. *Smart Materials and Structures*[J], 2015, 24(4): 045009.
- [26] Zhao X Y, Yang J N, Zhao D T, et al. *International Journal of Smart and Nano Materials*[J], 2015, 6(4): 239–250.
- [27] Ge L, Gong X L, Fan Y C, et al. *Smart Materials and Structures*[J], 2013, 22(11): 5029.

- [28] Farshad M, Benine A. *Polymer Testing*[J], 2004, 23(3): 347–353.
- [29] Yu M, Yang P A, Fu J, *et al. Sensors and Actuators A-Physical*[J], 2016, 245: 127–134.
- [30] Kramarenko E Y, Chertovich A V, Stepanov G V, *et al. Smart Materials and Structures*[J], 2015, 24(3): 035002.
- [31] Stepanov G V, Chertovich A V, Kramarenko E Y. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2012, 324(21): 3448–3451.
- [32] Koo J H, Dawson A, Jung H J. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*[J], 2012, 23(9): 1049–1054.
- [33] Yu M, Qi S, Fu J, *et al. Applied Physics Letters*[J], 2015, 107(11): 111901.
- [34] Yu M, Zhu M, Fu J, *et al. Smart Materials and Structures*[J], 2015, 24(11): 115021.
- [35] Li W H, Zhang X Z. *Smart Materials and Structures*[J], 2010, 19(3): 035002.
- [36] Qiao X Y, Lu X S, Li W H, *et al. Smart Materials and Structures*[J], 2012, 21(11): 115028.
- [37] Jiang W C, Yao J J, Gong X L, *et al. Chinese Journal of Chemical Physics*[J], 2008, 21(1): 87–92.
- [38] Wang Y L, Hu Y A, Chen L, *et al. Polymer Testing*[J], 2006, 25(2): 262–267.
- [39] Behrooz M, Sutrisno J, Zhang L Y. *Smart Materials and Structures*[J], 2015, 24(3): 035026.
- [40] Yu M, Qi S, Fu J, *et al. Composites Science and Technology*[J], 2017, 139: 36–46.
- [41] Chen D, Yu M, Zhu M, *et al. Smart Materials and Structures*[J], 2016, 25(11): 115005.
- [42] Yang J, Gong X L, Zong L H, *et al. Polymer Engineering and Science*[J], 2013, 53(12): 2615–2623.
- [43] Wang Y, Gong X L, Yang J, *et al. Industrial & Engineering Chemistry Research*[J], 2014, 53(8): 3065–3072.
- [44] Yang P G, Yu M, Fu J. *Journal of Nanoparticle Research*[J], 2016, 18(3): 61.
- [45] Nayak B, Dwivedy S K, Murthy K S R K. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*[J], 2015, 26(7): 830–839.
- [46] Li R, Sun L Z. *Applied Physics Letters*[J], 2011, 99(13): 131912.
- [47] Ge L, Xuan S H, Liao G J, *et al. Smart Materials and Structures*[J], 2015, 24(3): 037001.
- [48] Jung H S, Kwon S H, Choi H J, *et al. Composite Structures*[J], 2016, 136: 106–112.
- [49] Tian T F, Zhang X Z, Li W H, *et al. Study of PDMS based magnetorheological elastomers*[C]. UK: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2013, 412(1): 012038.
- [50] Koo J H, Khan F, Jang D D, *et al. Smart Materials and Structures*[J], 2010, 19(11): 117002.
- [51] Kallio M, Lindroos T, Aalto S, *et al. Smart Materials and Structures*[J], 2007, 16(2): 506.
- [52] Qi S, Yu M, Fu J, *et al. Journal of Intelligent Material Systems and Structures*[J], 2017, 29(2): 205–213.
- [53] Zhu M, Yu M, Qi S, *et al. Smart Materials and Structures*[J], 2018, 5(27): 055017.
- [54] Fuchs A, Sutrisno J, Gordaninejad F, *et al. Journal of Applied Polymer Science*[J], 2010, 117(2): 934–942.
- [55] Zhang W, Gong X L, Jiang W Q, *et al. Smart Materials and Structures*[J], 2010, 19(8): 085008.
- [56] Wang Y, Xuan S, Dong B, *et al. Smart Materials and Structures*[J], 2015, 25(2): 025003.
- [57] Günther D, Borin D Y, Günther S, *et al. Smart Materials and Structures*[J], 2011, 21(1): 015005.
- [58] Borin D, Günther D, Hintze C, *et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2012, 324(21): 3452–3454.
- [59] Tian T, Li W, Deng Y. *Smart Materials and Structures*[J], 2011, 20(2): 025022.
- [60] Bica I, Anitas E M, Bunoiu M, *et al. Journal of Industrial and Engineering Chemistry*[J], 2014, 20(6): 3994–3999.
- [61] Fan Y Q, Liao C R, Xie L, *et al. Journal of Materials Chemistry C*[J], 2018, 6(20): 5401–5411.
- [62] Ge L, Gong X L, Wang Y, *et al. Composites Science and Technology*[J], 2016, 135: 92–99.
- [63] Wang Y, Xuan S, Ge L, *et al. Smart Materials and Structures*[J], 2016, 26(1): 015004.
- [64] Martin J E, Anderson R A, Read D, *et al. Physical Review E*[J], 2006, 74(5): 051507.
- [65] Martin J E, Anderson R A, Gulley G. *Materials and Devices for Smart Systems*[J], 2004, 785: 433–438.
- [66] Guan X C, Dong X F, Ou J P. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2008, 320(3–4): 158–163.
- [67] Gong X L, Liao G J, Xuan S H. *Applied Physics Letters*[J], 2012, 100(21): 211909.
- [68] Qi S, Guo H, Chen J, *et al. Nanoscale*[J], 2018, 10(10): 4745–4752.
- [69] Feng J, Xuan S, Lv Z, *et al. Industrial & Engineering Chemistry Research*[J], 2018, 57(9): 3246–3254.
- [70] Zhang Q S, Peng B, Li D, *et al. IEEE Photonics Technology Letters*[J], 2014, 26(21): 2181–2184.
- [71] Wu J K, Gong X L, Fan Y C, *et al. Smart Materials and Structures*[J], 2010, 19(10): 105007.
- [72] Chen X, Xu X C, Ai S G, *et al. Applied Physics Letters*[J], 2014, 105(7): 071913.
- [73] Bayat A, Gordaninejad F. *Journal of Vibration and Acoustics*[J], 2015, 137(1): 011011.
- [74] Xu Z, Wu F, Guo Z. *Solid State Communications*[J], 2013, 154: 43–45.
- [75] Bayat A, Gordaninejad F. *Smart Materials and Structures*[J], 2015, 24(6): 065027.
- [76] Xu Z, Wu F. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*[J], 2015, 26(7): 858–864.
- [77] Yu M, Yang P A, Fu J, *et al. Smart Materials and Structures*[J],

- 2016, 25: 085046.
- [78] Gong X L, Zhang X Z, Zhang P Q. *Polymer Testing*[J], 2005, 24 (5): 669–676.
- [79] Shen Y, Golnaraghi M F, Heppler G R. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*[J], 2004, 15(1): 27–35.
- [80] Han Y, Hong W, Faidley L E. *International Journal of Solids and Structures*[J], 2013, 50(14): 2281–2288.
- [81] Yu Miao(余 森), Yan Xiaorui(严小锐), Xia Yongqiang(夏永强). *Journal of Functional Materials*(功能材料)[J], 2009, 40(8): 1263–1266.
- [82] Chen L, Jerrams S. *Journal of Applied Physics* [J], 2011, 110 (1): 013513.
- [83] Suo Si(索 思), Xu Zhaodong(徐赵东), Xu Feihong(许飞鸿). *Journal of Functional Materials*(功能材料)[J], 2016, 47(9): 9063–9067.
- [84] Dorfmann A, Ogden R. *European Journal of Mechanics-A/Solids*[J], 2003, 22(4): 497–507.
- [85] Bustamante R, Dorfmann A, Ogden R. *Journal of Engineering Mathematics*[J], 2007, 59(1): 139–153.
- [86] Bustamante R, Dorfmann A, Ogden R. *International Journal of Solids and Structures*[J], 2011, 48(6): 874–883.
- [87] Borcea L, Bruno O. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* [J], 2001, 49(12): 2877–2919.
- [88] Rudykh S, Bertoldi K. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* [J], 2013, 61(4): 949–967.
- [89] Danas K, Kankanala S, Triantafyllidis N. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*[J], 2012, 60(1): 120–138.
- [90] Sun S, Peng X Z, Guo Z. *Advances in Condensed Matter Physics*[J], 2014(2014): 186–193.
- [91] Sun Shulei(孙书蕾), Peng Xiongqi(彭雄奇), Guo Zaoyang(郭早阳), et al. *Journal of Functional Materials*(功能材料)[J], 2015, 46(4): 4128–4132.
- [92] Li W H, Zhou Y, Tian T F. *Rheologica Acta*[J], 2010, 49(7): 733–740.
- [93] Li W, Zhou Y, Tian T, et al. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*[J], 2010, 5(3): 341–346.
- [94] Norouzi M, Sajjadi Alehashem S M, Vatandoost H, et al. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*[J], 2016, 27(8): 1121–1135.
- [95] Xin F L, Bai X X, Qian L J. *Smart Materials and Structures*[J], 2016, 25(10): 105002.
- [96] Cantera M A, Behrooz M, Gibson R F, et al. *Smart Materials and Structures*[J], 2017, 26(2): 023001.
- [97] Lerner A A, Cunefare K A. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*[J], 2008, 19(5): 551–563.
- [98] Sun S S, Chen Y, Yang J, et al. *Smart Materials and Structures*[J], 2014, 23(7): 075009.
- [99] Li Qingyun(李清云), Xie Zhongliang(解忠良), Yang Zhirong(杨志荣), et al. *Noise and Vibration Control*(噪声与振动控制)[J], 2015, 35(4): 138–142.
- [100] Liao G J, Gong X L, Kang C J, et al. *Smart Materials and Structures* [J], 2011, 20(7): 075015.
- [101] Xu Z, Gong X L, Liao G, et al. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*[J], 2010, 21(10): 1039–1047.
- [102] Yu M, Zhao L J, Fu J, et al. *Smart Materials and Structures* [J] 2016, 25(11): 115039.
- [103] Li Y C, Li J C, Li W H, et al. *Smart Materials and Structures*[J], 2014, 23(12): 123001.
- [104] Tu J W, Yu Y, Huang L, et al. *Materials Research Innovations*[J], 2015, 18(sup2): 243–249.
- [105] Qiao Z, Ding J G. *Applied Mechanics & Materials*[J], 2013, 397–400: 422–426.
- [106] Li Rui(李 锐), Mou Wenjun(牟文俊), Chen Shiwei(陈世崑), et al. *Chinese Journal of Scientific Instrument*(仪器仪表学报)[J], 2016, 37(10): 2399–2406.
- [107] Zhu J T, Xu Z D, Guo Y Q. *Smart Materials and Structures* [J], 2012, 21(7): 075034.
- [108] Huang X, Mohla A, Hong W, et al. *Soft Matter* [J], 2014, 10 (10): 1537.
- [109] Sun S L, Peng X Q, Guo Z Y. *Advanced Materials Research* [J], 2013, 833: 291–294.
- [110] Xin F L, Bai X X, Qian L J. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*[J], 2016, 28(16): 2239–2254.
- [111] Wang X, Gordaninejad F. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*[J], 2013, 8688(3): 119–124.
- [112] Xu Z D, Suo S, Lu Y. *Smart Materials and Structures*[J], 2016, 25 (6): 065002.
- [113] Wei Kexiang(魏克湘), Meng Guang(孟 光), Xia Ping(夏 平), et al. *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2011, 47(11): 69–74.
- [114] Suo Si(索 思), Xu Zhaodong(徐赵东), Zhu Juntao(朱俊涛), et al. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*(地震工程与工程振动)[J], 2015, 01(5): 61–67.
- [115] Xu Zhenlong(许振龙), Wu Fugen(吴福根), Huang Liangguo(黄亮国). *Piezoelectrics & Acoustooptics*(压电与声光)[J], 2015, 37(2): 330–333.
- [116] Zhao Lujie(赵录杰). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017: 30.
- [117] Fu J, Li P D, Wang Y, et al. *Smart Materials and Structures*[J], 2016, 25(3): 035030.
- [118] Fu J, Liao G Y, Yu M, et al. *Smart Materials and Structures*[J], 2016, 25(12): 125019.
- [119] Gao W, Wang L L, Wang X Z, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2016, 8(22): 14182–14189.
- [120] Behrooz M, Gordaninejad F. *Smart Materials and Structures* [J], 2016, 25(2): 025011.
- [121] Fuhrer R, Schumacher C M, Zeltner M, et al. *Advanced Functional Materials*[J], 2013, 23(31): 3845–3849.

- [122] Feng J B, Xuan S H, Ding L, *et al. Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*[J], 2017, 103: 25–34.
- [123] Tang S Y, Zhang X, Sun S, *et al. Advanced Functional Materials* [J], 2018, 28(8): 1705484.
- [124] Schmauch M M, Mishra S R, Evans B A, *et al. ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2017, 9(13): 11895–11901.
- [125] Hu W, Lum G Z, Mastrangeli M, *et al. Nature*[J], 2018, 554 (7690): 81.
- [126] Bica I. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*[J], 2011, 17 (1): 83–89.
- [127] Ju B X, Yu M, Fu J, *et al. Industrial & Engineering Chemistry Research*[J], 2013, 52(33): 11583–11589.
- [128] Török G, Lebedev V, Cser L, *et al. Physica B*[J], 2000, 276: 396–397.
- [129] Szabó D, Czákó-Nagy I, Zrínyi M, *et al. Journal of Colloid and Interface Science*[J], 2000, 221(2): 166–172.
- [130] Zrínyi M. *Colloid & Polymer Science*[J], 2000, 278(2): 98–103.
- [131] Xulu P M, Filipcsei G, Zrínyi M. *Macromolecules* [J], 2000, 33 (5): 1716–1719.
- [132] Mitsumata T, Horikoshi Y, Takimoto J I. *E-Polymers*[J], 2007, 7 (1): 1717–1726.
- [133] Mitsumata T, Abe N. *Chemistry Letters*[J], 2009, 38(9): 922–923.
- [134] Mitsumata T, Abe N. *Smart Materials and Structures*[J], 2011, 20 (12): 124003.
- [135] Wilson M J, Fuchs A, Gordaninejad F. *Journal of Applied Polymer Science*[J], 2002, 84(14): 2733–2742.
- [136] Wei B, Gong X L, Jiang W Q, *et al. Journal of Applied Polymer Science*[J], 2010, 118(5): 2765–2771.
- [137] Yang P A, Yu M, Luo H, *et al. Applied Surface Science*[J], 2017, 416: 772–780.
- [138] Yang P G, Yu M, Fu J. *Journal of Nanoparticle Research*[J], 2016, 18(3): 61.
- [139] Raikher Y L, Rusakov V. *Brazilian Journal of Physics*[J], 2001, 31 (3): 366–379.
- [140] Raikher Y L, Rusakov V. *Colloid Journal* [J], 2001, 63 (5): 607–614.
- [141] Raikher Y L, Stolbov O. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [J], 2005, 289: 62–65.
- [142] Raikher Y L, Stolbov O. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [J], 2003, 258: 477–479.
- [143] Zubarev A Y. *Soft Matter*[J], 2012, 8(11): 3174–3179.
- [144] Zubarev A Y. *Soft Matter*[J], 2013, 9(20): 4985–4992.
- [145] An H N, Picken S J, Mendes E. *Soft Matter*[J], 2010, 6(18): 4497–4503.
- [146] An H N, Picken S J, Mendes E. *Polymer* [J], 2012, 53 (19): 4164–4170.
- [147] An H N, Sun B, Picken S J, *et al. The Journal of Physical Chemistry B*[J], 2012, 116(15): 4702–4711.
- [148] An H N, Picken S J, Mendes E. *Soft Matter*[J], 2012, 8(48): 11995–12001.
- [149] An H N, Groenewold J, Picken S J, *et al. Soft Matter*[J], 2014, 10(7): 997–1005.
- [150] Xu Y G, Liao G J, Zhang C Y, *et al. Applied Physics Letters*[J], 2016, 108(16): 161902.
- [151] Ju B X, Yu M, Fu J, *et al. Industrial & Engineering Chemistry Research*[J], 2013, 52(33): 11583–11589.
- [152] Yu M, Ju B X, Fu J, *et al. Industrial & Engineering Chemistry Research*[J], 2014, 53(12): 4704–4710.
- [153] Qu H, Yu M, Fu J, *et al. Smart Materials and Structures*[J], 2017, 26(10): 105026.
- [154] Li Y, Huang G, Zhang X, *et al. Advanced Functional Materials*[J], 2013, 23(6): 660–672.
- [155] Satarkar N S, Hilt J Z. *Journal of Controlled Release*[J], 2008, 130 (3): 246–251.
- [156] Souza G R, Molina J R, Raphael R M, *et al. Nature Nanotechnology* [J], 2010, 5(4): 291–296.
- [157] Meenach S A, Otu C G, Anderson K W, *et al. International Journal of Pharmaceutics*[J], 2012, 427(2): 177–184.
- [158] Zhou Y, Sharma N, Deshmukh P, *et al. Journal of the American Chemical Society*[J], 2012, 134(3): 1630–1641.
- [159] Xuan S H, Xu Y G, Liu T X, *et al. International Journal of Smart and Nano Materials*[J], 2015, 6(2): 135–148.
- [160] Xu Yangguang (许阳光), Gong Xinglong (龚兴龙), Wan Qiang (万强), *et al. Advances in Mechanics (力学进展)* [J], 2015, 45: 201508.
- [161] Xu Y G, Gong X L, Xuan S H, *et al. Soft Matter* [J], 2012, 8 (32): 8483–8492.
- [162] Xu Y G, Gong X L, Liu T X, *et al. Journal of Rheology*[J], 2014, 58(3): 659–679.
- [163] Liu T X, Xu Y G, Gong X L, *et al. Aip Advances* [J], 2013, 3 (8): 082122.
- [164] Gong X L, Xu Y G, Xuan S, *et al. Journal of Rheology*[J], 2012, 56(6): 1375–1391.
- [165] Pang H M, Xuan S, Liu T X, *et al. Soft Matter* [J], 2015, 11 (34): 6893–6902.
- [166] Xu Y G, Gong X L, Liu T X, *et al. Soft Matter*[J], 2013, 9(32): 7701–7709.
- [167] Liu T X, Gong X L, Xu Y G, *et al. Smart Materials and Structures* [J], 2014, 23(10): 105028.
- [168] Xuan S H, Zhang Y L, Zhou Y F, *et al. Journal of Materials Chemistry* [J], 2012, 22(26): 13395–13400.
- [169] Shahrivar K, de Vicente J. *Soft Matter*[J], 2013, 9(48): 11451–11456.
- [170] Golinelli N, Spaggiari A, Dragoni E, *et al. Journal of Intelligent Material Systems and Structures*[J], 2017, 28(8): 953–960.
- [171] Wang S, Jiang W Q, Jiang W F, *et al. Journal of Materials Chemistry C*[J], 2014, 2(34): 7133–7140.