

磁流变弹性体的研究进展

贺俊智^{1*}, 郭霞¹, 李冬冬², 张欢², 赵宁², 徐坚^{2*}, 迟海¹

(1. 北京市理化分析测试中心, 北京 100089; 2. 中国科学院化学研究所,
高分子物理与化学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要:磁流变弹性体(Magnetorheological-Elastomer, MRE)由磁流变液(Magnetorheological-Fluid, MRF)发展而来。MRE材料克服了MRF的易沉降、稳定性差、颗粒易磨损等缺点,并具备了响应速度快、可逆性好、结构设计简单、制备成本低等优点。因此,MRE材料被广泛用于吸振隔振、振动控制以及应力位移传感器等领域。通过总结MRE材料的制备方法和相关性能,能够加速它的发展。本文汇总了近几年MRE材料的制备方法、性能及应用研究现状,并展望了未来的发展方向。

关键词:磁流变弹性体; 填充颗粒; 外加磁场; 应用

引言

磁流变智能材料作为众多新兴智能材料中的一员,吸引了越来越多研究者的关注。早在1945年,电流变效应就被Winslow发现^[1,2],在其研究基础上,1948年Rabinwo发现了磁流变效应^[3,4]。他把铁磁性颗粒与水或油等液体混合后,在外磁场的作用下,该混合液表观粘度会呈指数增加,并呈现出了类固体特性,该现象即为磁流变效应,这种液体被称作磁流变液(Magnetorheological-Fluid, MRF),也就是最初的磁流变材料。后来这种磁性材料经过人们不断的研究与探索,又发展延伸出磁流变弹性体(Magnetorheological-Elastomer, MRE)、磁流变泡沫、磁流变胶等材料^[5],而在这些材料中,MRE则是应用最为广泛的一种。

MRE材料是利用高分子聚合物(通常为橡胶)替换掉磁流变液中的液体成分而形成的材料,它克服了MRF易沉降、稳定性差、颗粒易磨损等缺点^[6],又具备响应速度快、可逆性好、结构设计简单、制备成本低等优点^[7],并被广泛用于航空、运输、机械、能源等领域。因其具备优异的力学性能、电学性能和磁学性能,在吸振隔振、振动控制以及应力位移传感器方面发挥了十分重要的作用。本文简单概述了磁流变弹性体的制备方法,综述了近几年文献中针对磁流变弹性体性能的相关研究,同时汇总了MRE材料的相关应用,最后对其前景进行了展望。

1 磁流变弹性体的制备

磁流变弹性体由基体材料和软磁性颗粒所组成,在其制备过程中可通过增减软磁性颗粒的混入量,或者改变混入时的加工条件,来控制所形成磁流变弹性体的种类。如果在制备过程中没有加入了外部磁场,软磁性颗粒在基体材料中无序排列,这样的磁流变弹性体为各向同性磁流变弹性体。相反的,在制备过程中加入了外部磁场,使得软磁性颗粒在基体材料中形成了有序的链状结构,而这样的磁流变弹性体便是各向异性磁流变弹性体。

MRE材料的传统制备方法是通过加热混匀液态基质和液态软磁性颗粒后添加不同种类的添加剂,而这种方式对基质和软磁性颗粒的状态条件要求很高,制备效率低。现阶段开发出几种MRE材料

10.14028/j.cnki.1003-3726.2018.05.003

收稿:2017-10-27;修回:2018-03-25;

作者简介:贺俊智(1989—),男,硕士,目前从事材料性能研究及检测工作;

* 通讯联系人, E-mail: hejunzhi007@163.com; jxu@iccas.ac.com.

的新型制备方法,这些方法降低了制备时对原料状态的要求,改善了传统方法的制备缓慢、成品形态单一等不足,提高了制备效率。

1.1 传统 MRE 材料的制备

Mietta 等在聚二甲基硅氧烷(PDMS)中加入羧基铁粉,并在均匀的磁场中固化,从而得到只在一个方向上显示出导电性的一种各向异性磁流变弹性体^[8]。Ge 等将羰基铁粒子(CIPs)、聚二甲基硅氧烷和碳纳米管(CNT)在均匀磁场中组合制备,得到导电的磁流变弹性体。CIPs 在多孔性流体中呈线性方向,因此所制备的复合材料拥有各向异性^[9]。Gao 等使用纳米大小的四氧化三铁(Fe_3O_4)粒子作为固体稳定剂,磁聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)与 Fe_3O_4 纳米粒子通过热液过程聚合而成^[10]。Aziz 等以不同类型的多壁碳纳米管(MWCNT)作为添加剂,合成了磁流变弹性体^[11]。Dong 等通过分别加入 3-(甲氧基丙基)丙基丙烯酸酯和三乙氧乙烯基硅烷(VTEO)两种偶联剂来修饰二氧化钛颗粒的表面,并利用这两种二氧化钛粒子分别和硅橡胶制备了磁流变弹性体^[12]。Landa 等在 PDMS 弹性体中加入镍纳米粒子,然后将这些混合物在均匀磁场的作用下热固化,通过形成对应用磁场方向的伪链状结构,从而获得了宏观结构各向异性的磁流变弹性体^[13]。

1.2 MRE 材料的新型制备方法

Bastola 等使用 3D 打印技术开发出一种新型的混合磁流变弹性体。作者以硅橡胶为原料,在制备这种混合弹性体时,需要通过 3D 打印机控制流体的体积,将其一层一层地封装在弹性体矩阵中,每一层都是由流体和弹性体组成的复合结构。与目前的流体弹性体相似,3D 打印的混合弹性体的机械性能可以通过外部应用的磁场来控制,外部磁场的磁通量越高,其力学性能越好^[14]。

Tian 等改善了传统的天然橡胶和硅橡胶等常规材料需要很长时间才能固化的不足,开发了一种高温下快速固化 PDMS 的方法,此方法可在 90min 内快速制备 MRE:先将 PDMS 与羧基铁粒子的混合物放置在一个真空烘箱中,抽真空 30min 消除气泡,并将其放置在两片塑料纸之间压成膜。然后烘 35min,最终成型^[15]。

2 磁流变弹性体的性能探究

磁流变弹性体有着优秀的力学性能、电学性能和磁致性能。其力学性能表现在磁场作用下的线性粘弹性体动力学特性,即其性能介于线弹性体和线性粘性流体之间,描述其动态特性的指标包括复模量、储能模量、损耗模量、损耗因子等。其中,储能模量与弹性体的刚度成正比,而损耗因子则决定弹性体的粘性阻尼^[16]。磁流变弹性体还具备独特的电学性能。由于磁流变弹性体的基体一般都是绝缘体,其电阻主要由填充颗粒决定。MRE 因其内部颗粒结构的特殊性以及内部颗粒具有的导电性,使其具备敏感的外界激励响应性。因此,准确控制软磁性颗粒在混合基体中的分散状态可以提高磁流变弹性体的导电性^[17]。而磁流变弹性体的磁学性能则包括磁导率、磁流变效应等。其中,磁流变效应是磁流变弹性体最重要的性能指标,直接决定了磁流变弹性体的使用范围和使用效果^[18]。

2.1 MRE 的力学性能探究

力学性能是 MRE 材料在工业上应用最多的优势性能,而这方面的研究重点是通过改变磁流变弹性体的基体材料、填充颗粒或控制制备过程中外加磁场的大小及方向,来改善或优化力学性能,使其能更好地应用于工业领域以及其它方面。

Pickering 等用双-[3-(三乙氧基硅)丙基]-四硫化物对铁砂进行表面改性,用其制备磁流变弹性体,并对该磁流变弹性体(MRE)的动态力学性能进行了研究,同时研究了其形态特征,最终得出结论:双-[3-(三乙氧基硅)丙基]-四硫化物是铁砂颗粒与橡胶之间的偶联剂,并且当其含量为 6%时,其二者交联密度最高^[19]。

Li 等对基于二甲基硅氧烷制备得到的磁流变弹性体进行分析与表征,探究了 MRE 的局部磁场和粒

子的相互作用磁能,对 MRE 的晶格和 BCC 结构与磁场相关的力学性质进行了理论分析和数值模拟,并通过平行板流变仪对模拟结果进行了验证,得到了一致的结果^[20]。

Ge 等研究了由羰基铁粒子(CIPs)、聚二甲基硅氧烷和碳纳米管(CNT)组成的磁流变弹性体(MREs)。其中,CIPs 在基质中呈线性排列。该 MRE 材料显示出了典型的磁流变学效应,并且它的剪切存储模量有所增加^[9]。

Yu 等使用聚苯胺(PANI)对磁流变弹性体中的羰基铁粒子进行改性,并制备了一种新型的磁流变弹性体(MRE)。通过粒子特性分析结果对比原始羰基铁粒子和 PANI 改性羰基铁粒子之间的形态、表面功能性质、磁性性质和表面吸附行为的变化,采用 PANI 改性的羰基铁粒子 MRE 样品具有较大的存储模量、较小的损耗系数,以及较低的佩恩效应。结果表明,通过改进羰基铁粒子和矩阵之间的界面相互作用,提高了字段诱导的存储模量和存储模量的敏感性^[21]。

Kumar 等为研究软磁性颗粒的体积、基体内分布与样品的力学性能之间的关系,将胶粒大小的铁颗粒与室温硫化(RTV)的橡胶溶液混合,制备成磁流变弹性体试样,并通过力学试样证明,可通过改变该软磁性颗粒的体积及分布得到不同力学性能的 MRE 材料(见图 1)^[22]。

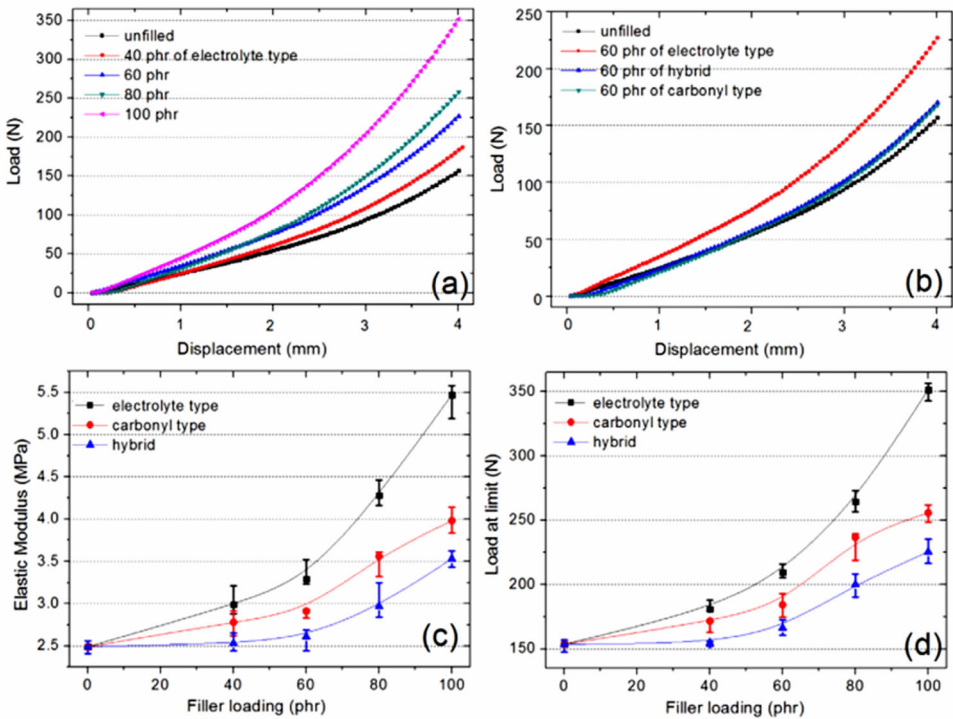


图 1 填充不同数量和不同种类填充颗粒 MRE 试样的各向同性力学性能

(a)不同数量填充颗粒的压缩应力曲线;(b)填充 60phr 不同填充颗粒时的压缩应力曲线;(c)弹性模量;
(d)不同填充颗粒在不同填充数量时的负载曲线。

Figure 1 Isotropic mechanical properties of specimens

(a) Compressive load as a function of displacement at increasing filler content from 0 to 100phr of electrolyte filler;
(b) compressive load against displacement at 60phr of electrolyte filler, carbonyl filler, and their hybrid;
(c) elastic modulus; (d) load at limit with increasing filler content from 0 to 100phr in a rubber matrix.

Khimi 等研究了含有非改性或硅烷改性铁砂粒子的磁流变弹性体(各向同性与各向异性均有),采用动态力学分析方法,通过对频率、应变振幅和温度的动态力学分析,测量了在循环拉伸载荷下的能量消耗。扫描电子显微镜的证据表明,使用改性铁砂不会干扰基质中磁性粒子链的形成,而随着磁场强度的增加,链的长度也会越来越长(见图 2)^[23]。

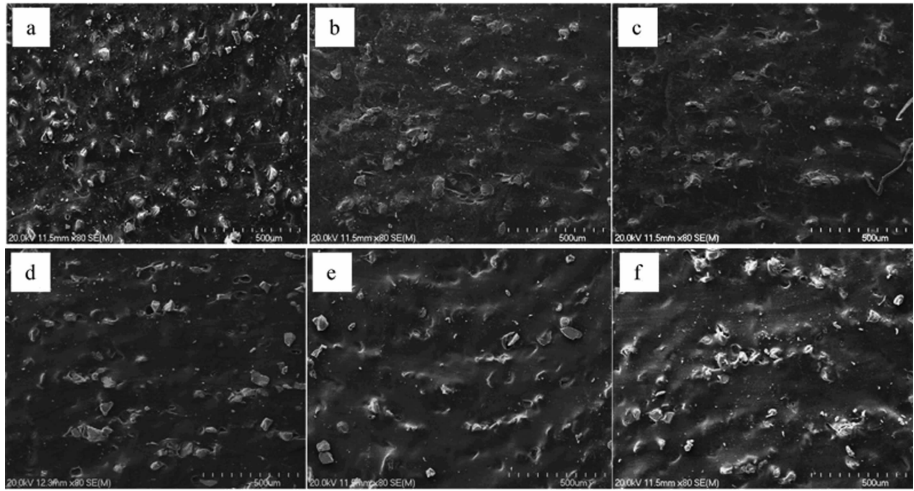


图 2 包含铁砂的天然橡胶基 MRE 材料的扫描电子显微镜图像

(a)0mT 各向同性 MRE;(b)200mT 各向异性 MRE;(c)400mT 各向异性 MRE;(d)600mT 各向异性 MRE;
(e)800mT 各向异性 MRE;(f)1000mT 各向异性 MRE

Figure 2 SEM images of iron sand-natural rubber MREs

(a) Isotropic MRE-0 mT; (b) anisotropic MRE-200mT; (c) anisotropic MRE-400mT;
(d) anisotropic MRE-600mT; (e) anisotropic MRE-800mT and anisotropic MRE-1000mT.

Aziz 研究了不同多壁碳纳米管(MWCNT)作添加剂的 MRE 材料在不同磁场下对激振频率的依赖关系。结果表明,与频率增量相比,具有功能化多壁碳纳米管的 MRE 材料的存储模量和损失系数在性能上有明显的增加^[11]。

Dong 等通过对偶联剂改性的二氧化钛粒子特性分析得出,改性粒子在形态上的变化不大,但增加了初始二氧化钛粒子的大小。相比于初始二氧化钛粒子填充样品,改性的二氧化钛颗粒填充的弹性体,在粒子与基体之间形成了桥接结构,增强了力学性能,并具有较高的介电常数,即增强的界面间键强度。这说明通过提高二氧化钛颗粒与硅橡胶之间的粘结强度,可以提高其性能^[12]。

Ju 等探究了一种以聚氨酯为基质的新型多孔 MRE 在外部磁场作用下的力学性能。结果表明,多孔 MRE 材料的孔隙度随发泡剂含量的增加而增加,并且这种多孔 MRE 材料冲击能量的耗散能力优于传统的 MRE^[24]。

不难看出,MRE 材料的力学性能由软磁性颗粒与基质间的结构有关,两者间的结构越稳定,相对应的 MRE 材料的力学性能越好。

2.2 MRE 的电学性能探究

由于 MRE 材料的电学性能是由填充颗粒所决定,因此现阶段 MRE 材料电特性的研究主要针对的是填充软磁性颗粒的材料、体积及排列形态,可通过改变这些条件来控制所制备 MRE 材料的电特性,从而得到性能更为优异的 MRE 材料。

Mietta 等研究了一种基于多二甲基硅氧烷(PDMS)制备而成的且仅在单方向显示导电性的各向异性磁流变学材料。这种材料只有在与内部链状结构平行的方向上有明显的导电性。当在恒磁场中施加压力时,导电率就会增加。同时,该材料不会出现磁电或压电性滞后现象,可通过施加外部机械力或磁力改变导电率(见图 3)^[8]。

Ge 等研究了由羰基铁粒子、聚二甲基硅氧烷和碳纳米管(CNTs)组成的导电磁弹性弹性体,由于在晶胞网络上有 CNTs 的存在,导致 MRE 具备导电性,并且 MRE 的电阻随拉伸应变的增加而增加^[9]。

通过这些研究我们可以看出,MRE 材料的电学性能是由软磁性颗粒决定的,当颗粒的导电性能越好,其制备得到的 MRE 材料的导电性越强;颗粒间的空隙越小,相对应的 MRE 材料的导电性越好。

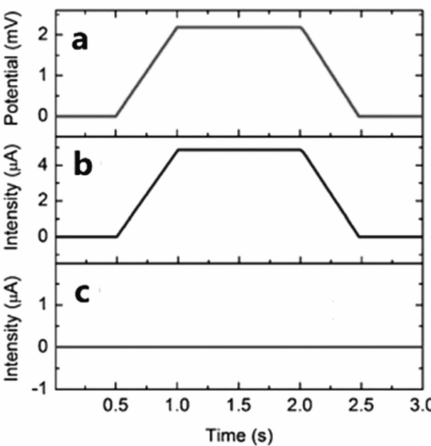


图 3 基于多二甲硅氧烷制备的 MRE 材料两接触点间导电性验证
(a)两接触点间电压;(b)当接触点平行于材料内部伪链状结构时电流;
(c)当接触点不平行于材料内部伪链状结构时电流。

Figure 3 Verification of MRE conductivity base on PDMS

(a)Potential between contacts as function of time;(b)current between contact when the contact point is parallel to the pseudo-chain structure;(c)current between contact when the contact point is no parallel to the pseudo-chain structure.

2.3 MRE 的磁致性能探究

同样的,MRE 材料的磁致性能也是由填充颗粒所决定,因此现阶段需要通过探究如何改变 MRE 材料填充颗粒才能得到磁致性能更为优异的 MRE 材料。

Khimi, R 等针对含硅烷改性铁砂粒子的磁流变弹性体进行磁滞研究,其基质中含有不同含量的碳黑填料。结果表明,样品的能量吸收比常规的 MRE 材料在频率和应变幅度的范围上都要高,这在很大程度上是由于制备方案中存在碳黑素。对各向异性的 MRE 材料进行了进一步的评估,结果表明,该系统的能量吸收比具有相同炭黑含量的样品高,这证实了制备时加入的改性铁砂提高了阻尼^[25]。

Semisalova 等研究了均匀磁场对含有不同填充颗粒(Fe、NdFeB 和 Fe₃O₄)磁流变弹性体的性能的影响,通过对 MRE 材料平面电容的测量,得到了介电常数。当应用场垂直于电容板时,观察到介电常数(磁电介质效应)的增加,并且磁电介质效应依赖于磁性填料的类型、大小和浓度。其中,填充钕铁硼颗粒(NdFeB)的磁流变弹性体拥有最高的磁相应。同时,作者提出了一种解释磁电介质效应物理原因的简单模型^[26]。

与电学性能相似,MRE 材料的磁致性能与软磁性颗粒的磁致性能息息相关,颗粒的磁致性能越好,相对应的 MRE 材料的磁致性能越好。

2.4 MRE 的其它性能

MRE 材料本身的流变性也是需要研究的性质之一。Sedlacik 等对磁流变学弹性体的流变性能和随机分布进行了研究,并对其电磁屏蔽性能进行了探讨。最终实验结果表明,在超高频频段上,所有的开发的 MRE 材料都能成功地应用于电磁辐射的吸收^[27]。Aziz 等通过使用带有电磁装置的流变仪,对不同磁场下的流变特性进行了评价,实验结果表明:随着频率的增加,具有功能化多壁碳纳米管的 MRE 的存储模量和损失系数也有明显的增加^[11]。

3 磁流变弹性体的应用研究

由于 MRE 材料的力学性能可控,具备良好的隔振吸振效果,因此现阶段 MRE 材料主要应用在隔振吸振器、振动控制等领域。同时,又因为 MRE 材料具有良好的电磁学性能,可设计以 MRE 材料为原料

的电容器、应力应变传感器。

3.1 MRE 材料的力学应用

Dutta 等研制了一种非线性隔振器,探究了与谐波和位移激振的隔振效果。作者还在阻尼器的设计中包含了 Bouc-Wen 迟滞元素,并对隔振器进行了三次非线性的设计改动^[28]。

Komatsuzaki 等利用具有自感功能和自适应性的 MRE 开发一种新型的动态减振器。吸收器的固有频率可迅速调谐至与 MRE 的应变信号主频率相同的频率上。而阻尼性能试验表明,在不使用外部传感器的情况下,采用频率可调的动态吸收器可以充分降低系统在非平稳干扰下的振动^[29]。

Zhang 等基于逆模型和滑模控制(SMC)策略设计了一个新的半自动控制控制器,并提出了实车悬架与磁流变阻尼器,利用该装置与参考系统之间的动态误差,推导出车辆悬架系统所获得的控制阻尼力,提出了改进的布-温滞流速度(f-v)模型和阻尼器的逆模型,并采用了不相移的连续调制(CM)滤波算法,将控制阻尼力转换成阻尼器的直接驱动电流。此外,还提出了一种半主动滑模控制器(SSMC)。经计算结果表明,SSMC 可以极大地抑制车辆悬架的振动,从而提高车辆的舒适性和安全性。此研究为全车辆悬架自适应半主动控制的通用控制方案建立了一个坚实的理论基础^[30]。

3.2 MRE 材料的电磁学应用

BalasoIU 等研究了以硅橡胶为基质,填充了固定数量羰基铁微粒子和不同体积聚氨酯弹性体的 MRE 材料,并将其制成平面电容器。利用平面电容法和电容表达式作为磁场强度的函数,结合线性弹性理论,得到了该复合材料的静磁弹性模型^[31]。

李光辉等利用 MRE 的磁电阻特性,设计了一种位移传感系统。当活塞杆产生位移后,其周围的螺旋线管也产生空间磁场的变化,导致下端 MRE 处的磁场发生变化,同时其阻值也随之发生变化。使用转换电路将 MRE 的大阻值变化转变为小电压变化,再根据实验测得电压变化来标定活塞杆的位移变化,最终达到位移传感的效果^[32]。

现阶段 MRE 材料的应用范围仍有一定局限性,磁流变弹性体的磁流变效应(弹性模量的变化幅度)还有待提高,有些性能的研究还未见涉及,如温度稳定性、老化特性等。若这些问题得以解决,制备出磁流变效应强、长期稳定性好的磁流变弹性体,那么,就可以使用磁流变弹性体制成各种性能更加优异的减振支座、悬架、冲击吸振器、隔振器等装置,其潜在的应用领域包括飞机起落架减振系统、直升机旋翼部件、武器反后坐系统、精密电子设备的振动隔离、旋转机械和发电设备的支座、制造自动化系统的运动控制等^[16]。

4 结束语

磁流变弹性体作为一种最具发展潜力的磁流变材料,可广泛用于航空、运输、机械、能源等领域。它有着响应快、可逆性好、结构设计简单、制备成本低等优点。现阶段的磁流变弹性体虽然还存在不足,但可通过选择改性基体材料、改变填充颗粒、控制制备时施加的外加磁场等方式进行改善。例如,可通过改变制备原料增加 MRE 材料的模量,提高材料磁流变效应,改善材料耐久性能;还可以对制备系统进行改进,优化磁场结构;如果需要硫化的弹性体可改善其硫化工艺等^[33],这样才能使 MRE 材料的性能更加优异,使其能够更加广泛地应用于各个领域。

参考文献:

- [1] Yanagida H. Angew Chem Int Ed, 1998, 100(10): 1443~1446.
- [2] Rabinow J. Techn News Bull, 1948, 32(4): 54~60.
- [3] Rabinow J. AIEE Trans, 1948, 67(2): 1308~1315.
- [4] Carlson J D. J Intell Mater Syst Struct, 2002, 13(7/8): 431~435.
- [5] 范艳层. 顺丁橡胶基磁流变按形体的研制及其阻尼性能研究. 安徽: 中国科学技术大学博士学位论文, 2013.

[6] 卢秀首,乔秀颖,杨涛,等. 磁性材料及器件,2011,42(6):1~6,46.

[7] Brigadnov I A, Dorfmann A. Int J Solids Struct, 2003, 40(18): 4659~4674.

[8] Mietta J L, Jorge G, Perez O E, Maeder T, Negri R M. Sens Actuators A, 2013, 192(4): 34~41.

[9] Ge L, Gong X, Wang Y, Xuan S. Compos Sci Technol, 2016, 135, 92~99.

[10] Gao C Y, Shang H P, Choi H J. Colloid Polym Sci, 2017, 295(6), 959~966.

[11] Aziz S A A, Mazlan S, Nik Ismail N I, Ubaidillah Khairi M, Yunus N J. Phys Conf Ser, 2017, 795, 012074.

[12] Dong X, Niu C, Qi M. J Mater Chem C, 2016, 4(28).

[13] Landa R A, Soledad A P, Ruiz M M, Perez O E, Butera A, Jorge G, Oliveira L P, Negri R M. J Appl Phys, 2013, 114 (21): 204136.

[14] Bastola A K, Hoang V T, Li L. Mater Des, 2016, 114(2017 January): 391~397.

[15] Tian T F, Zhang X Z, Li W H, Alici G, Ding J. J Phys Conf Ser, 2013, 412(1).

[16] 汪建晓,孟光. 功能材料,2006,37(5):706~709.

[17] 肖林京,范亚敏,朱绪力,等. 功能材料,2016,7(47):07216~07219,07224.

[18] 黄学功,刘春,王昊. 功能材料,2016,2(47):2143~2147.

[19] Pickering K L, Khimi S R, Ilanko S. Composites Part A, 2015, 68(68): 377~386.

[20] Li W, Zhang X, Tian T, Wen W. Am Ins Phys, 2013; 129~132.

[21] Yu M, Qi S, Fu J, Zhu M, Chen D. Compos Sci Technol, 2017, 139, 36~46.

[22] Kumar V, Lee D J. J Magn Magn Mater, 2017, 441, 105~112.

[23] Khimi S R, Pickering K L. Composites Part B, 2016, 90, 115~125.

[24] Ju B X, Yu M, Fu J, Zheng X, Yang Q. Study on the properties of porous magnetorheological elastomers under shock effect. 2013: 2039.

[25] Khimi R. Composites Part B, 2015, 83, 175~183.

[26] Semisalova A S, Perov N S, Stepanov G V, Kramarenko E Y, Khokhlov A R. Soft Matter, 2013, 9(47): 11318~11324.

[27] Sedlacik M, Mrlik M, Babayan V, Pavlinek V. Compos Struct, 2016, 135.

[28] Dutta S, Chakraborty G. J Sound Vibration, 2014, 333(20): 5097~5114.

[29] Komatsuzaki T, Inoue T, Iwata Y. Exp Mech, 2016, 56(5): 1~10.

[30] Zhang H, Wang E, Zhang N, Min F, Subash R, Su R Y. Chin J Mech Eng, 2015, 28(1): 63~75.

[31] Balasoiu M, Bica I. Results in Physics, 2016, 6, 199~202.

[32] 李光辉,黄学功,王昊. 磁性材料及器件,2014,2:36~39.

[33] 许金楼. 天然橡胶基磁流变弹性体的制备及性能研究. 江苏:南京理工大学硕士学位论文,2015.

Research Progress on Magnetorheological-Elastomer

HE Jun-zhi^{1*}, GUO Xia¹, LI Dong-dong², ZHANG Huan², ZHAO Ning², XU Jian^{2*}, CHI Hai¹
(1. *Beijing Center for Physical and Chemical Analysis, Beijing 100089, China;*
2. *Institute of Chemistry Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Polymer Physics and Chemistry, Beijing 100190, China*)

Abstract: Magnetorheological elastomer (MRE) is developed from magnetorheological fluid (MRF). MRE materials avoid disadvantages such as easy settlement of MRF, poor stability, low wear resistance and so on. It had the advantages of fast response speed, good reversibility, simple structure design and low preparation cost. Therefore, MRE materials are widely used in vibration isolation, vibration control and stress displacement sensor. By summarizing the preparation methods and related properties of MRE materials, it can accelerate its development. This paper summarized the preparation methods, properties and application of MRE materials in recent years, and looked forward to the future development direction.

Key words: Magnetorheological elastomer; Filling particles; External magnetic field; Application