

硅橡胶基磁流变弹性体的研制*

李剑锋, 龚兴龙, 张先舟, 张培强

(中国科学技术大学 力学和机械工程系, 中科院材料力学行为与设计重点实验室, 安徽 合肥 230027)

摘要: 磁流变弹性体是一种新型的智能材料, 它的力学性能可以受磁场控制, 在需要变刚度的器件等方面有着广泛的应用前景。本文总结了一些制备高性能磁流变弹性体的基本方法, 尝试采用不同的组份制备了以硅橡胶为基体的高性能磁流变弹性体。并使用改进的动态机械分析仪来测试分析所制样品的磁致剪切储能模量和损耗因子等性能。结果表明, 所制备的磁流变弹性体在 600mT 磁感应强度下的剪切储能模量相对变化可达到 501%。

关键词: 磁流变弹性体; 磁致剪切模量; 材料设计

中图分类号: O631; TB381

文献标识码: A

文章编号: 1001-9731(2006)06-1003-03

1 引言

从 1948 年 Rabinow^[1] 发现磁流变效应至今, 磁流变材料已发展成为包括磁流变液、磁流变泡沫、磁流变弹性体等成员的大家族。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(MR elastomers)是磁流变材料的一个新的分支。它是由高分子聚合物(如橡胶等)和铁颗粒组成, 混合有铁颗粒的聚合物在外加磁场作用下固化, 使颗粒在基体中形成有序结构。固化后这种有序结构就留在基体中, 因此它的弹性模量可以由外加磁场来控制。由于它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, 因而近年来成为磁流变材料研究的一个热点^[2~5]。

磁流变弹性体的性能参数很多。如磁控动柔量或动模数、拉伸强度、硬度、滞后生热等。其中最重要的性能参数是磁流变弹性体的磁控性能部分, 它反映了磁场对材料性质的影响, 表现为力和磁的耦合场下的材料特性。这是磁流变材料的共同特性。磁流变弹性体虽然兼有磁流变液和弹性体的优点, 但是在和磁场作用下剪切强度可以变化一个数量级以上的磁流变液不同, 目前的磁流变弹性体, 其磁致剪切模量普遍存在可控范围较小的缺点, 一般其绝对模量变化 < 2MPa,

相对模量变化 < 50%。这是限制磁流变弹性体工业化应用的瓶颈。因此如何提高其磁流变效应是目前国际上研究的重点。

本文总结了一些制备高性能磁流变弹性体的基本方法, 尝试以硅橡胶为基体制备高性能的磁流变弹性体。使用不同的组份在不一定强度的磁场下固化来制备磁流变弹性体。并使用改进的动态机械分析仪(DMA)来测试分析它们的磁控动力学性能的变化, 用测试结果作为标准来检测研制出的不同样品的性能。分析制备时不同组分对样品性能的影响。发现使用低粘度的硅橡胶、硅油混合物作为基体, 在高强度磁场下固化制备出的磁流变弹性体具备非常突出的磁流变效应。制备出的材料在 0.316Hz 的加载频率下, 在从零场到 600mT 的磁感应强度下, 而相对模量变化达到 500% 以上, 而具有这样优良性能的橡胶基磁流变弹性体, 国内外尚无文献报道。

2 磁流变弹性体的制备

在磁流变弹性体制备过程中, 为了有利于形成有序结构, 必须使颗粒易于移动到适当位置, 即提高运动速度和延长运动时间, 本文采用了以下工艺措施: (1) 提高颗粒聚集的主动动力, 如磁作用力和添加剂表面张力。为此选用高磁导率的颗粒, 提高制备时的磁场强度, 使用表面张力较大的添加剂等; (2) 降低颗粒的运动阻力, 如基体的粘弹性阻力和颗粒的相互阻碍作用。为此使用低粘度基体和对颗粒做表面处理等; (3) 尽可能延长颗粒的运动时间, 如延长基体的固化时间, 但会降低生产率。

按照这些制备的指导原则, 我们使用可以在室温下固化的 704 硅橡胶作为基体, 将粒径约 60 μ m 的羰基铁粉颗粒加入硅油中混合后, 再加入流体态硅橡胶原料中, 混合物搅拌均匀后放入真空容器中用真空泵抽真空, 去除混合物内部的气泡, 然后把混合物放入定型模具中, 经过 24h 以上时间的常温缓慢固化, 即可制备出磁流变弹性体。在固化过程中要将模具放入约 1T 的强磁场下, 使颗粒形成有序结构。图 1 是其中一个样品的微观结构, 可以明显地看到铁颗粒组装成柱状结构。

* 基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20050358010)

收到初稿日期: 2005-12-15

收到修改稿日期: 2006-02-07

通讯作者: 龚兴龙

作者简介: 李剑锋 (1982-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 师承龚兴龙教授, 主要从事电磁流变智能材料方向的研究。

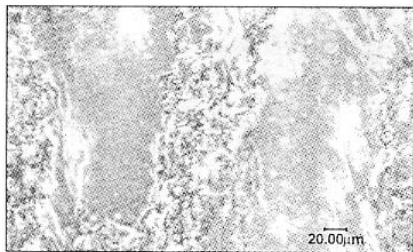


图1 磁流变弹性体的微观结构

Fig 1 The microstructure of MR elastomer

磁流变弹性体中铁粉不同的体积比也就是质量比对磁流变弹性体的磁流变效应影响是很大的。美国的 L. C. Davis 利用有限元对铁颗粒的体积比进行了分析,他认为 27% 的体积比会得到最好的磁流变效应^[5]。本文制备了多种不同质量比的弹性体。表 1 列出了其中几种供分析用样品的成分(质量比)。这 4 种样品的铁粉含量依次降低,硅橡胶和硅油含量依次升高。

表 1 磁流变弹性体样品的组成

Table 1 The composition of MR elastomer samples

样品号	1	2	3	4
铁粉	70%	60%	50%	40%
硅橡胶	15%	20%	25%	30%
硅油	15%	20%	25%	30%

3 磁流变弹性体的性能测试

评价磁流变弹性体的磁流变性能,主要是考察它的磁致模量的变化。弹性体也是一种粘弹性体,它的力学性能是非线性的。动态力学分析是研究材料粘弹性的重要手段。本文采取测量材料的动态剪切储能模量和损耗因子随磁场的变化来对磁流变弹性体的磁流变性能进行分析。

DMA 是比较成熟的粘弹性体动态力学测试系统。粘弹性体的剪切储能模量和损耗因子会随着测试频率、温度、时间、应力(或应变)和环境因素(如湿度、介质等)变化^[6]。而磁流变弹性体的剪切储能模量和损耗因子还会随着磁场的变化而变化。这是磁流变弹性体磁流变效应的体现。传统的 DMA 仪器是不能够做材料随磁场变化的性能测试,为此,我们对 DMA 进行了改进,在英国 Triton Technology 公司的 Tritec 2000 DMA 基础上自研制配备了一个可调范围 0~1100mT 的磁场,这样就可以测试材料在磁场中性能。

用这个系统对表 1 所示各样品在不同磁场作用下的剪切储能模量和损耗因子变化曲线,如图 2~5 所示,它们分别对应样品 1~4。图中磁场变化从 0~900mT,测试的频率分别为 0.316、1、3.16、10 和 31.6 Hz。从图中可以看出,随着磁场的增加,磁流变弹性体的剪切储能模量发生了显著的变化。其中变化最显著的一条曲线为铁粉含量 70% 的样品 1 在 0.316Hz 时的测试数据,从 0mT 的 0.09MPa 变到最多变化到

600mT 的 0.55MPa,绝对改变量达到了 0.46MPa,相对改变量 501%;而变化最不明显的一条曲线是铁粉含量为 40% 的样品 4 在 31.6Hz 时的测试数据,从 0mT 的 0.14MPa 变到最多变化到 600mT 的 0.28MPa,绝对改变量达到了 0.14MPa,相对改变量 100%。可见硅橡胶磁流变弹性体的磁流变效应是十分明显的,即使变化不显著的相对改变量也达到了 100%。从图 4 中也可看出损耗因子随磁场的变化很小。

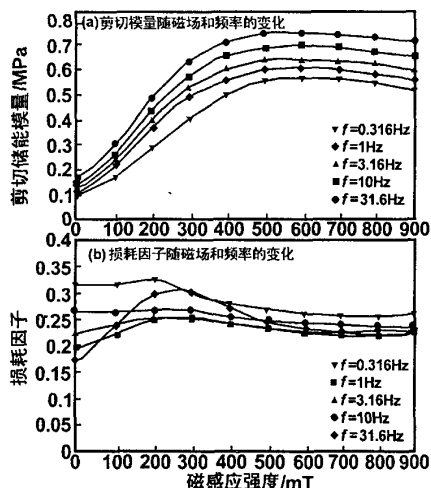


图 2 样品 1 的磁流变效应

Fig 2 The magnetorheological effect of sample 1

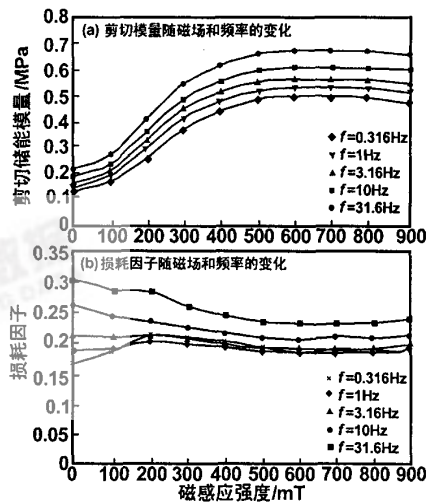


图 3 样品 2 的磁流变效应

Fig 3 The magnetorheological effect of sample 2

从测试结果,还可以看出样品的剪切储能模量并不是随着磁场的变化一直上升,而是在大约 600mT 时达到最大值,剪切储能模量对磁场的变化达到饱和。之后随着磁场的变化不大甚至有所下降。因此比较不同样品的磁流变效应,本文采用 600mT 和零场时的剪切储能模量进行比较。图 6 给出 4 个样品在 600mT 和零场剪切模量的相对变化量随频率的变化。从图中明显可以看出铁粉含量较多时,硅橡胶基磁流变弹性

体的磁流变效应较好。其中铁粉质量比达到 70% 的样品 1 的剪切储能模量的相对改变量最高达到 501%，远远超过了传统磁点偶极子理论预报的最高上限^[5]，这样高的磁流变效应国内外还没有见过类似报道。从图中，也可以看出磁流变弹性体的磁致剪切储能模量随着频率的改变而变化，但是不同的样品剪切储能模量相对改变量随频率变化梯度不同。其中磁流变效应最好的样品 1 的剪切储能模量相对改变量随频率变化最为明显。

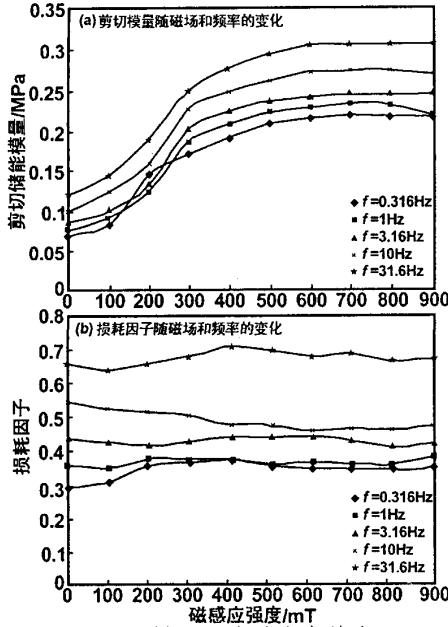


图 4 样品 3 的磁流变效应

Fig 4 The magnetorheological effect of sample 3

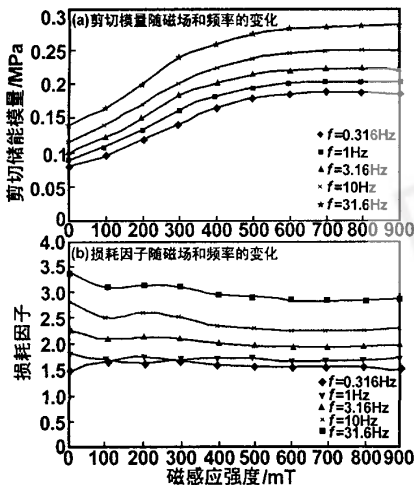


图 5 样品 4 的磁流变效应

Fig 5 The magnetorheological effect of sample 4

从这些结果还可以看出，不同样品的剪切储能模量在相同频率下，饱和值是不同的。由于 600mT 时样品的剪切储能模量达到饱和值。因此比较 600mT 时剪切储能模量的大小比较有意义。图 7 给出 4 个样品对应不同激励频率时 600mT 处的剪切储能模量。从

图 7 中明显可以看出样品 1 的剪切储能模量的饱和值是最大的，样品 4 的剪切储能模量的饱和值最小。可以看出制备磁流变弹性体时不同的铁粉含量对剪切储能模量的最大值的的影响也是很大的，铁粉含量越高，磁流变弹性体的剪切储能模量的饱和值就越大。

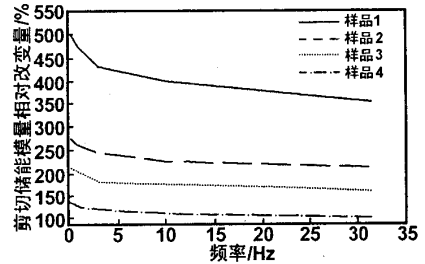


图 6 相对磁致剪切模量随频率的变化

Fig 6 The relative magnetic-induced modulus increment versus exciting frequency

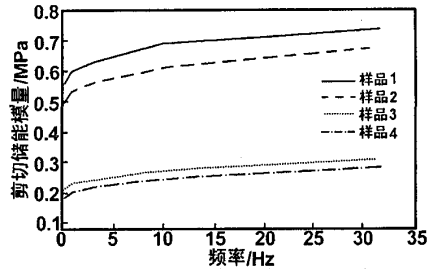


图 7 剪切储能模量随频率的变化

Fig 7 The shear modulus versus frequency

4 结论

本文以硅橡胶、羰基铁粉和硅油为原料，研制了不同组分的磁流变弹性体，并用改进的 DMA 评价它们在不同磁场下的剪切储能模量和损耗因子。结果表明：

(1) 磁流变弹性体是一种特殊的粘弹性材料。和普通粘弹性材料类似，其剪切储能模量随着频率增加而增加。而其独特的性能是，在磁场作用下，剪切储能模量比无磁场下明显增大。其磁致增量的大小基本不随频率变化。同时材料损耗因子随磁场变化不大；

(2) 在制备的样品中，铁粉的含量越大，不仅其剪切储能模量越大，而且其剪切储能模量随磁场变化的相对改变量(与无磁时相比)越大；

(3) 通过优化和改进制备方法，制成了一种实验室可用的，稳定的高性能磁流变弹性体。在 600mT 磁感应强度下的相对剪切储能模量改变量达到零场下的 500% 以上。

致谢:感谢中国科学院“百人计划”项目的大力支持!

参考文献:

[1] Rabinow J. [J]. AIEE Transactions, 1948, 67: 1308-1315.
 [2] Jolly M R, Bender J W, Carlson J D. [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1999, 10(1): 5-13.

- [2] Hao T. [J]. *Adv Mater*, 2001, 13: 1847.
 [3] Winslow W M. [P]. US: 2 417 850, 1947.
 [4] Westhaver J W. [P]. US: 3 970 573, 1976.
 [5] Zhao X P, Yin J B. [J]. *Chem Mater*, 2002, 14: 2258.
 [6] Yin J B, Zhao X P. [J]. *Chem Mater*, 2004, 16: 321.
 [7] Vempati R K, Mollah M Y A, Raddy G R, et al. [J]. *J Mater Sci*, 1996, 31: 1255.
 [8] Wen J, Wilkes G L. [J]. *Chem Mater*, 1996, 8: 1667.
 [9] Zhao X P, Duan X. [J]. *J Colloid and Interface Sci*, 2002, 251(2): 376.
 [10] Block H, Rattay P. *Progress in Electrorheology* [M]. New York: Plenum Press, 1995. 19.
 [11] Hao T, Kawai A, Ikazaki F. [J]. *Langmuir*, 1998, 14: 1256.
 [12] Shih I Y H, Conssel H. [J]. *Int J Mod Phys B*, 1994, 8: 2835.

Glycerol/CMS/TiO₂ modified compound particles and their electrorheological performance

QIAO Yin-po, YIN Jian-bo, ZHAO Xiao-peng

(Institute of Electrorheological Technology, Department of Applied Physics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The Glycerol/CMS/TiO₂ compound particles are synthesized by combination with hydrolyzation and sol-gel technique. The structure and the nature of the particles are determined by FT-IR technique that shows there is somewhat weak interaction between organic and inorganic component. The dielectric test shows that the ER fluid based on Glycerol/CMS/TiO₂ particles has the better dielectric properties due to the interaction of the particles and the addition of the glycerol. The shear stress of the ER fluid can reach almost 1kPa under 3kV/mm DC when the shear rate is 100s⁻¹. Furthermore, the static yield stress of the ER fluid can be 18kPa when 5kV/mm DC was applied which is higher than that of CMS, modified TiO₂ and their blends ERF. In addition, the sedimentation of the ER fluid can be much improved.

Key words: electrorheological material; organic/inorganic compound; CMS; increased shear stress

(上接第 1005 页)

- [3] Lokander M, Stenberg B. [J]. *Polymer Testing*, 2003, 22: 677-680.
 [4] Bellan C, Bossis G. [J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2002, 16(17-18): 2447-2453.

- [5] Davis L C. [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 85(6): 387-396.
 [6] 过梅丽. 高聚物与复合材料的动态热力学分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.

Research on magnetorheological elastomer based on silicone rubber

LI Jian-feng, GONG Xing-long, ZHANG Xian-zhou, ZHANG Pei-qiang

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

Abstract: Magnetorheological (MR) elastomer is a new kind of smart material. Its mechanical properties can be controlled by an applied external magnetic field. It can be widely used in devices which need changeable stiffness. In this paper, after some principles to fabricate good MR elastomers are introduced, some MR elastomer samples based on silicone rubber matrix are prepared. A self-modified DMA is setup to evaluate their shear modulus and loss factor at different applied magnetic field and exciting frequency. Results show that the relative magnetic-induced increment of shear modulus can reach 501% when the applied magnetic field is 600mT.

Key words: magnetorheological elastomer; magnetic-induced shear modulus; material design

(上接第 1008 页)

Experimental and theoretical investigation on dynamic behavior of a flexible rotor supported on a shear-type magnetorheologic fluid damper

ZHU Chang-sheng

(Department of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The experimental results about the unbalance response of a flexible rotor supported on the shear-type magnetorheologic fluid (MRF) damper were briefly given at different applied currents and MRFs. The general dynamic model of MRF damper was presented which included fluid force, magnetic force and eddy current force. The unbalance responses of the flexible rotor-damper system were theoretically investigated. The theoretical results are basically agreement with the experimental ones, but there are many problems to be done. It is shown that there exists a break-loose phenomenon in the journal position. The break-loose speed at which the journal starts to move is determined by MRF property, applied current, and rotor imbalance.

Key words: magnetorheologic fluid; damper; rotor; dynamics; vibration