

文章编号:1000-582X(2012)08-017-05

羰基铁粉的 C 含量对磁流变弹性体磁流变效应的影响

居本祥,余 淼,浮 洁

(重庆大学 a. 光电工程学院;b. 光电技术及系统教育部重点实验室,重庆 400044)

摘 要:磁流变弹性体是磁流变液的一种固体模拟,目前的磁流变弹性体普遍存在磁流变效应不高的问题,限制了它在工程上的应用。针对羰基铁粉中 C 元素含量对羰基铁粉最大磁导率的影响,从而研究羰基铁粉 C 含量对磁流变弹性体磁流变效应的影响。采用硅橡胶为基体和具有不同 C 含量的羰基铁粉制备同组分磁流变弹性体,通过改进的动态机械分析仪来测试所制备样品的磁致模量,最后的实验数据分析结果表明,羰基铁粉的 C 含量越低,所制备的磁流变弹性体的磁流变效应越高。

关键词:磁流变弹性体;羰基铁粉;磁致模量;磁流变效应

中图分类号:O631

文献标志码:A

Influence of carbon content of carbonyl iron powder on MR effect of magnetorheological elastomer

JU Benxiang, YU Miao, FU Jie

(a. Key Laboratory for Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education;

b. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Magnetorheological elastomer(MRE)is the solid analog of MR fluid, there are several problems limit the practical application of MRE, such as low MR effect. According to the fact that carbon content of carbonyl iron powder(CIP) affect the maximum permeability of CIP, this paper studies the influence of carbon content of CIP on MR effect of MRE. The MRE samples are fabricated by silicone rubber and CIP with different carbon content. A dynamic mechanical analyzer is modified to characterize dynamic mechanical properties of MRE samples. Experimental result shows MR effect has an increasing tendency with the decreasing of carbon content.

Key words: magnetorheological elastomer; carbonyl iron powder; magneto-induced modulus; MR effect

磁流变材料是一类具有流变特性的磁功能材料,在外加磁场的作用下,其流变特性可以发生连续、迅速和可逆的变化。磁流变弹性体是磁流变家族中的新成员,是磁流变液的一种固体模拟,在磁流变弹性体中载液被高分子聚合物所替代,所以磁流变弹性体具有不随时间沉降、稳定性好和无需密封

等优良特性^[1-7]。

磁流变弹性体(MRE)是由高分子聚合物和铁磁性颗粒复合制备而成^[8],高分子聚合物主要是橡胶材料,国内外研究者已经用硅橡胶、天然橡胶、丁晴橡胶等试制不同的磁流变弹性体,而要制备具有优良磁流变效应的磁流变弹性体,关键的因素还有铁磁性颗粒

收稿日期:2012-02-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51073179, 50830202);中央高校基本科研业务费科研专项资金资助项目(CDJZR10120005);教育部高等学校博士学科点科研基金资助项目(20090191110011)

作者简介:居本祥(1983-),男,重庆大学博士研究生,主要从事智能结构及系统研究。

余淼(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65111016;(E-mail)yumiao@cqu.edu.cn。

的选取问题^[9-11]。铁磁性颗粒本身的磁学性质,很大程度上决定了磁流变效应的高低,因此文中针对铁磁性颗粒本身的化学成分对磁学性能的影响,选用不同成分的铁磁性颗粒制备磁流变弹性体样品,并进行磁流变弹性体样品的实验研究与分析。该研究对制备高性能的磁流变弹性体具有指导意义。

1 实验设计及磁流变弹性体样品制备

1.1 实验试剂与装置

羰基铁粉:平均粒径 $3.3 \mu\text{m}$,江苏天一超细金属粉末有限公司;硅油:二甲基硅油,粘度 500 cps,天津恒兴化学试剂制造有限公司;704 硅橡胶:江苏省溧阳市宏大有机硅胶厂;磁场发生装置:牌号为 N35 钕铁硼永磁体,尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,宁波华东磁阿宝电子商务有限公司;真空干燥箱:DZF-6050,上海博迅实业有限公司;真空泵:2XZ-4 型旋片式真空泵,谭氏真空设备有限公司;显微镜:KEYENCE VHX-600,日本 KEYENCE 公司;动态力学分析仪(DMA,型号 Tritec 2000):英国 Triton Technology 公司。

1.2 实验设计的依据

羰基铁粉英文名称为 carbonyl iron powder (CIP),CAS 编码:7439-89-6,UN3089,分子式:Fe,分子量:55.845。影响 Fe 磁学性能的最主要因素就是 C 含量,因为 Fe 中的 C 元素对磁畴壁的移动起到阻碍作用,会降低 Fe 的磁导率,增加矫顽力,导致磁学性能的降低。羰基铁粉中其它化学成分(如 N、O 含量)也会对磁学性能产生有害的影响,但是影响极微弱。Fe 的最大磁导率与矫顽力和 C 的质量分数之间的关系如图 1 所示^[12]。

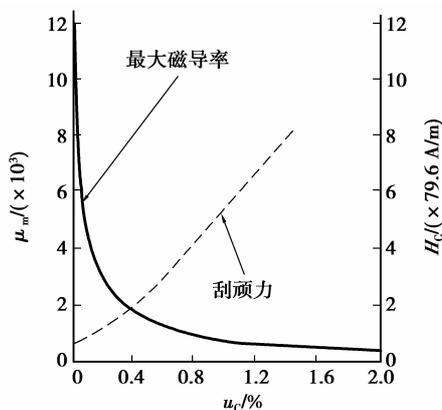


图 1 铁的最大磁导率与 C 的质量分数之间的关系

从图 1 中可以看出,在 C 含量较低时,具有较高的最大磁导率与较低的矫顽力,随着 C 含量的增加,最大磁导率出现了衰减趋势,并且矫顽力也大幅增加。

作为磁流变弹性体的填充颗粒,羰基铁粉属于一种软磁材料,最大磁导率和矫顽力(尤其是磁导率)是软磁材料性能极为重要的衡量指标。

1.3 磁流变弹性体样品的制备

使用硅橡胶作为基体制备磁流变弹性体样品,磁流变弹性体的制备过程如下:首先将精确称量的羰基铁粉加入到二甲基硅油中充分混合,再将 704 硅橡胶加入到羰基铁粉与硅油的混合物中,经均匀搅拌后放入真空干燥箱中使用旋片式真空泵把混合物中的气泡滤除,然后把真空处理后的混合物倒入铝合金制的定型模具中定型,放入预先设定的牌号为 N35 钕铁硼永磁体的磁场发生装置中预结构化,预结构化的磁场为 680 mT,经预结构化 2 h 后,放在常温下固化约 24 h,便可以制备出磁流变弹性体样品。

磁流变弹性体样品的制备中,选用 3 种牌号的羰基铁粉制备组分质量百分比相同的 3 种样品。羰基铁粉的选择如表 1 所示。文中制备的磁流变弹性体样品组分质量比是羰基铁粉 65%,704 硅橡胶 20%,二甲基硅油 15%。其中二甲基硅油是一种聚二甲基硅氧烷,它与硅橡胶具有较好的相容性,可以起到增塑剂的作用。增塑剂的添加,可使未固化成型前的样品粘度降低,易于让羰基铁粉颗粒在磁场下形成链状与柱状的有序结构。研究表明预结构化磁流变弹性体(即颗粒形成有序结构)具有更高的磁流变效应^[13]。

表 1 3 种羰基铁粉的 Fe 与 C 元素的含量 wt%

样品序号	Fe	C
1	99.55	0.015
2	99.54	0.022
3	98.10	0.630

对制备的 3 种样品使用 KEYENCE VHX-600 数码显微镜对微观结构进行拍摄,可以明显的看到内部的铁磁性颗粒分布呈链状结构,如图 2 所示。

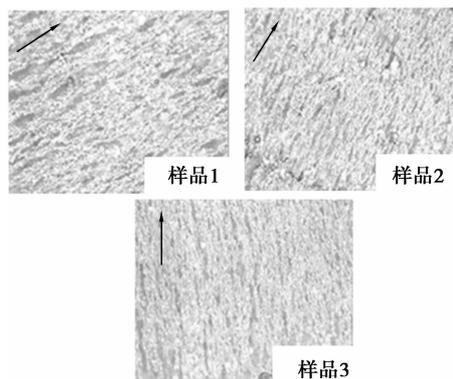


图 2 磁流变弹性体的微观结构

2 磁流变弹性体样品的性能测试与分析

2.1 磁流变弹性体动态力学测试系统建立

磁流变弹性体目前主要应用在变刚度的器件实验中^[14]。因此评价磁流变弹性体样品性能的主要参数是磁流变弹性体的磁致模量与磁流变效应,文中主要对磁流变弹性体进行动态力学性能的测试,材料的动态力学行为是指材料在振动条件下,即在交变应力(或交变应变)作用下做出的响应。因为磁流变弹性体动态力学性能比静态力学性能更能反映实际使用条件下的状况。使用的动态力学性能测试系统是对传统的动态机械分析仪(DMA)进行改造后的系统(测试系统如图 3 所示),DMA 是比较成熟的粘弹性体动态力学测试仪器,因此在 DMA 系统上配置了 1 个可调范围为 0~1 100 mT 的电磁场^[15],可以进行磁流变弹性体的磁致性能的测试。运用这套动态性能测试系统对所制备的 3 种样品进

行测试,测试时使用的磁场变化范围为 0~1 000 mT,频率分别为 10、20、30、40 Hz,剪切应变为 0.61%,样品大小为 10 mm×10 mm×3.3 mm。

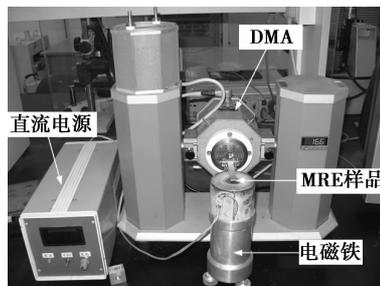


图 3 磁流变弹性体测试系统

2.2 测试结果分析

使用配置电磁场的 DMA 对磁流变弹性体样品进行测试,经过对测试数据的处理,得到磁流变弹性体在不同频率下的磁致剪切模量如图 4 所示。

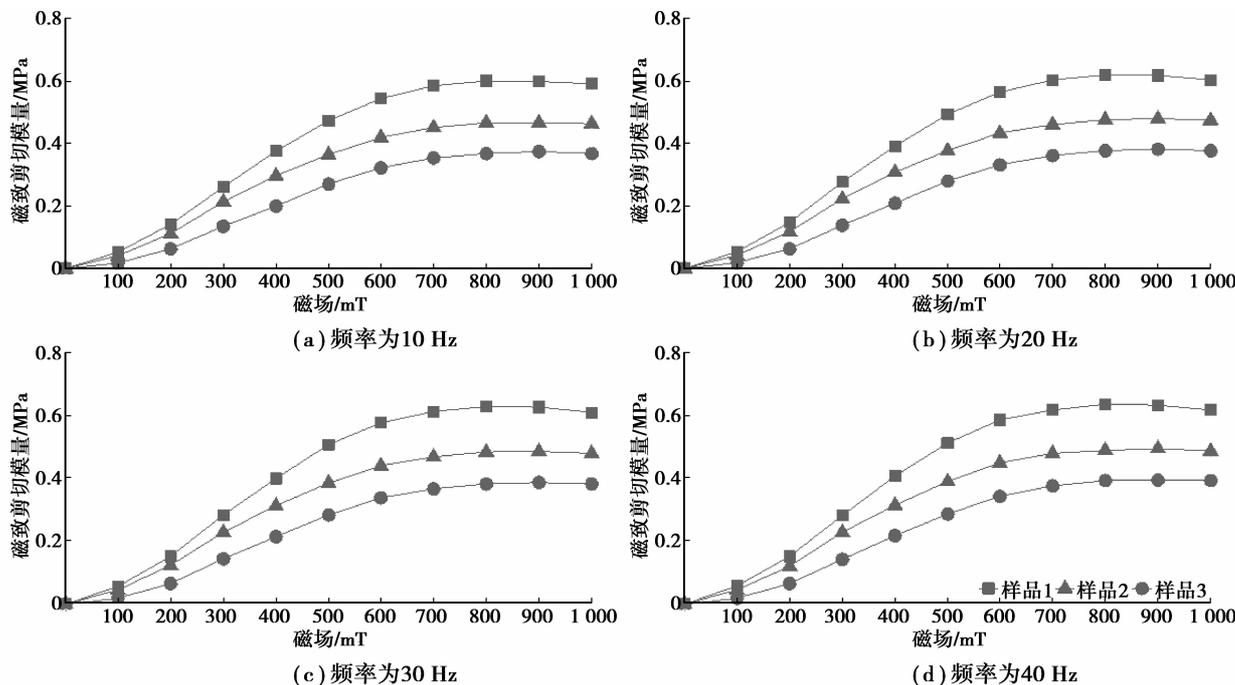


图 4 不同频率下的磁致剪切模量

图 4 是表示 3 种样品在 10~40 Hz 频率下磁致剪切模量的变化曲线,磁致剪切模量是指磁流变弹性体在外磁场作用下达到的最大剪切模量与零场下模量的绝对变化量^[13]。从图 4 中看出,在不同的频率下磁流变弹性体的磁致模量在不同磁场的加载下表现了相同的变化趋势,即随着磁场的增加,磁致模量也在不断的增大。但随着从样品 1 到样品 3 羰基铁粉的 C 含量的不断升高,可以明显看出从样品 1 到样品 3 在相同的测试磁场下磁致模量是呈递减的变化趋势。并且 3 种样

品在不同的频率下都是在 800 mT 时达到了磁饱和状态,也即达到了在不同频率下的最大磁致模量,其中样品 1 的最大磁致模量是 0.64 MPa,样品 2 与样品 3 分别为 0.49 MPa 和 0.39 MPa。从实验结果中证明了由于 C 含量对羰基铁粉磁学性能的影响,造成了实验结果中磁致模量的较大差异,当羰基铁粉中 C 含量较低时,磁流变弹性体受磁场的作用更加显著,随着 C 含量的逐渐增加,磁流变弹性体在磁场作用下的磁致效应呈现了逐渐衰减的状况。

文中的磁流变弹性体都是在有场下制备,通过图 2 的微观结构可以看出内部的羰基铁粉颗粒呈现链状有序排列。因此对磁流变弹性体进行计算模型建模如图 5 所示。

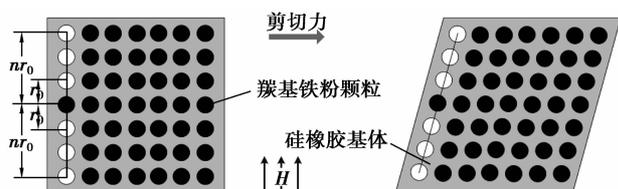


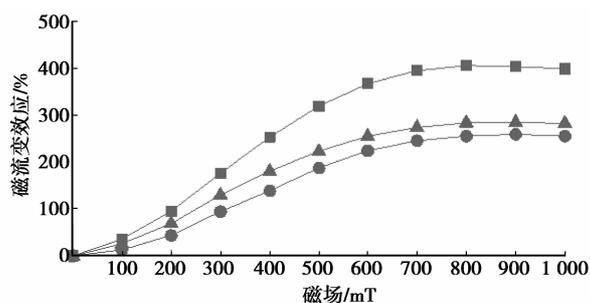
图 5 磁流变弹性体的计算模型

由于羰基铁粉中 C 元素含量对最大磁导率的影响,造成了对磁流变弹性体样品中磁致模量(ΔG)的影响,借助 SHEN Y 建立的耦合场模型的磁致模量公式(见式(1))^[16],对实验结果进行分析。

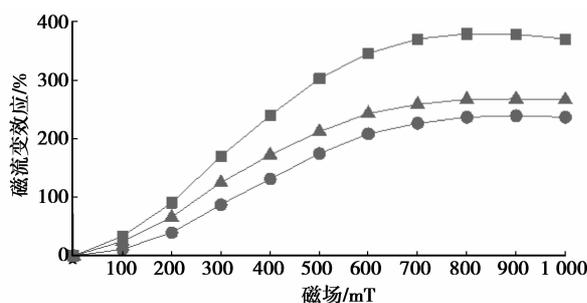
$$\Delta G = \frac{9\varphi C m^2 (4 - r^2)}{8r_0^3 \pi^2 a^3 \mu_1 \mu_0 (1 + \epsilon^2)^{7/2}}, \quad (1)$$

$$m = J_p V_i, \quad (2)$$

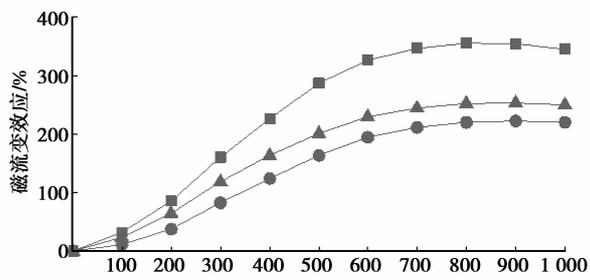
其中: m 是磁偶极矩; $C = \sum_{j=1}^n \frac{1}{j^3}$; φ 为颗粒体积比; r 为剪应变; r_0 为两相邻颗粒间的初始间距; μ_0 真空磁导率; μ_1 磁流变弹性体磁导率; J_p 是颗粒的极化强度; V_i 为每个颗粒的体积。



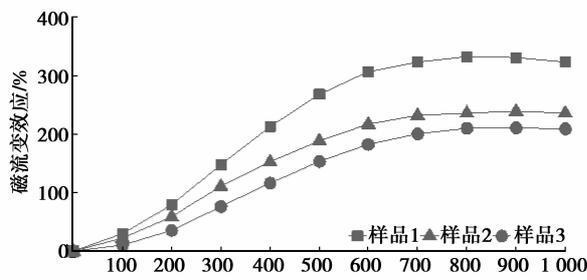
(a) 频率为 10 Hz



(b) 频率为 10 Hz



(c) 频率为 30 Hz



(d) 频率为 40 Hz

图 6 不同频率下的磁流变效应

图 6 不同频率下的磁流变效应反映了和图 4 磁致剪切模量同样的变化趋势,都是随着外磁场的增强在不断的增大。当磁流变弹性体达到磁饱和状态时,磁流变效应也达到了最大值,在 10 Hz~40 Hz

又因

$$J_p = \mu_0 M, \quad (3)$$

$$M = \chi H, \quad (4)$$

$$\chi = \mu - 1, \quad (5)$$

其中: M 颗粒的磁化强度; H 为外磁场强度; χ 颗粒的磁化率; μ 颗粒的磁导率。

结合式(1)~式(5)得

$$\Delta G = \frac{9\varphi C (4 - r^2) \mu_0 H^2}{8r_0^3 \pi^2 a^3 \mu_1 (1 + \epsilon^2)^{7/2}} (\mu - 1)^2, \quad (6)$$

$$\text{令 } \frac{9\varphi C (4 - r^2) \mu_0 H^2}{8r_0^3 \pi^2 a^3 \mu_1 (1 + \epsilon^2)^{7/2}} = k, \quad (7)$$

$$\text{因此 } \Delta G = k(\mu - 1)^2. \quad (8)$$

由于羰基铁粉的磁导率要远大于 1,所以当颗粒达到最大磁导率 μ_{\max} 时,

$$\Delta G = k\mu_{\max}^2. \quad (9)$$

从式(9)中看出,磁致模量与最大磁导率的二次方成正比关系,因此选用最大磁导率较高的羰基铁粉颗粒制备的磁流变弹性体将具备较高的磁致模量,并且磁致模量将直接影响磁流变弹性体的磁流变效应,磁流变效应是磁流变弹性体的另一个重要的性能衡量指标,是磁流变弹性体在外磁场作用下的模量相对变化量。3 种样品在不同测试频率下的磁流变效应如图 6 所示。

频率范围内,样品 1 到样品 3 的最大磁流变效应分别为 404.8%、283.7% 和 259%。表明了羰基铁粉 C 含量越低,制备的磁流变弹性体磁流变效应越高。

3 结 论

主要研究了羰基铁粉的C元素含量的不同导致磁学性能的变化对磁流变弹性体磁致模量与磁流变效应的影响,实验结果表明:随着羰基铁粉自身C含量的增加,磁流变弹性体的磁致模量和磁流变效应都出现了降低的趋势。研究结果为高性能的磁流变弹性体的制备提供了指导与依据。

致谢:感谢中国科学技术大学的龚兴龙教授团队为实验提供动态力学性能测试系统。

参考文献:

- [1] 汪建晓,孟光. 磁流变弹性体研究进展[J]. 功能材料, 2006,37(5):706-709.
WANG Jianxiao, MENG Guang. Research advances in magnetorheological elastomers [J]. Journal of Functional Materials, 2006,37(5):706-709.
- [2] Sun T L, Gong X L, Jiang W Q, et al. Study on the damping properties of magnetorheological elastomers based on cis-polybutadiene rubber [J]. Polymer Testing, 2008,27(4):520-526.
- [3] Deng H X, Gong X L. Application of magnetorheological elastomer to vibration absorber [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2008,13(9):1938-1947.
- [4] Lokander M, Stenberg B. Improving the magnetorheological effect in isotropic magnetorheological rubber materials [J]. Polymer Testing, 2008,22(6):677-680.
- [5] Brigadnow I A, Dorfmann A. Mathematical modeling of magneto-sensitive elastomers [J]. International Journal of Solids and Structures, 2003,40(18):4659-4674.
- [6] Lokander M, Stenberg B. Performance of isotropic magnetorheological rubber materials [J]. Polymer Testing, 2003,22(3):245-251.
- [7] Von lockette P R, Loffland S E, Koo J H, et al. Dynamic characterization of bimodal particle mixtures in silicone

- rubber magnetorheological materials [J]. Polymer Testing, 2008,27(8):931-935.
- [8] Carlson J D, Jolly M R. MR fluid, foam and elastomer devices [J]. Mechatronics, 2000,10(4-5):555-569.
- [9] Boczkowska A, Awietjan S F, Wejrzanowski T, et al. Image analysis of the microstructure of magnetorheological elastomers [J]. Journal of Materials Science, 2009,44(12):3135-3140.
- [10] Lokander M, Stenberg B. Improving the magnetorheological effect in isotropic Magnetorheological rubber materials [J]. Polymer Testing, 2003,22(6):677-680.
- [11] Li J F, Gong X L. Dynamic damping property of magnetorheological elastomer [J]. Journal of Central South University of Technology, 2008,15(sup. 1):261-265.
- [12] 严密,彭晓领. 磁学基础与磁性材料[M]. 1版. 杭州:浙江大学出版社,2006.
- [13] LI J F, GONG X L, XU Z B, et al. The effect of pre-structure process on magnetorheological elastomer performance [J]. International Journal of Materials Research, 2008,99(12):1358-1364.
- [14] Deng H X, Gong X L, Wang L H. Development of an adaptive tuned vibration absorber with magnetorheological elastomer [J]. Smart Material and Structure, 2006,15:111-116.
- [15] 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.
GONG Xinglong, LI Jianfeng, ZHANG Xianzhou, et al. Development of testing system for properties of magnetorheological elastomers [J]. Journal of Functional Materials, 2006,37(5):733-735.
- [16] 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.

(编辑 陈移峰)