

碳黑对磁敏高弹体力学性能的影响*

陈琳, 龚兴龙

(中国科学技术大学 力学和机械工程系, 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: 磁敏高弹体也称磁流变弹性体, 是一种新型的功能材料和智能材料, 其力学性能可以由外加磁场来控制。制备了不同碳黑含量的磁流变弹性体, 并实验研究了其磁流变效应和热稳定性, 得出了碳黑对磁流变弹性体力学性能的影响。实验结果表明, 制备磁流变弹性体时, 向基体中添加适量的碳黑, 能够增强材料的磁流变效应、降低材料的损耗因子、提高材料的热稳定性。

关键词: 磁敏高弹体; 磁流变弹性体; 碳黑; 力学性能

中图分类号: TB381

文献标识码: A

文章编号: 1001-9731(2007)增刊-1251-04

1 引言

磁流变液是一种智能型的功能材料, 是由微米或亚微米尺寸软磁性颗粒均匀分散于液相中所构成的悬浮体系。磁流变液在外加磁场作用下, 产生类似液-固相变, 其结果使整个悬浮体系的屈服应力和表观粘度有2~3个数量级的变化。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)、以及可以通过调节磁场大小来控制材料的力学、电学、磁学等性能连续变化, 因而在航空航天、汽车、振动控制等领域具有广泛的应用前景^[1-5]。

磁敏高弹体是在磁流变液基础上发展起来的一类新型材料。通过使用高分子聚合物来代替磁流变液液态基体, 解决了磁流变液易沉降、稳定性差、颗粒易磨损等缺点。通过物理化学手段, 将微米级软磁性颗粒散布在粘塑性态的高分子聚合物基体中, 固化后形成的高弹性的复合材料即为磁敏高弹体。由于其起源于磁流变液, 因此现在也俗称磁流变弹性体。

在磁场的作用下, 磁流变弹性体内部的颗粒被磁化后, 产生相互作用力。当磁流变弹性体受到形变时, 这些磁力在其内部形成反向力矩, 从而增强了材料抵抗变形的能力。因此, 磁流变弹性体的力学性能(如刚度和阻尼)在外加磁场下会发生变化^[6,7]。这种现象称为磁流变弹性体的磁流变效应。根据如此特性, 已有研究人员利用磁流变弹性体设计出可应用于减振降噪领域的调频式吸振器^[6,8]。

一方面, 应用器件的工作效果很大程度上依赖于材料单元的性能。然而, 目前研制的磁流变弹性体仍然存在很多不足之处, 如磁流变效应不够高、阻尼比过大、

热稳定性差等。因此研制出高性能磁流变弹性体尤为重要; 另一方面, 在高分子聚合物工业中, 碳黑是一种有效的活性添加剂, 可以改善材料多方面的性能^[9]。因此, 碳黑在高性能磁流变弹性体的研制中显出了较高的研究价值。

本文首先尝试以碳黑为添加剂, 制备了不同成分的磁流变弹性体。再通过研究与比较这些磁流变弹性体的磁流变效应和热空气老化稳定性, 确定了碳黑对磁流变弹性体力学性能的影响。

2 实验

2.1 材料制备

以天然橡胶(合肥万友橡胶厂)为基体, 以铁粉(德国BASF, 平均粒径1.9 μm)和碳黑(合肥万友橡胶厂, 平均粒径250nm)为主要添加剂, 制备了6种磁流变弹性体样品。其成分配比如表1所示。

表1 磁流变弹性体样品成分配比(体积比)

Table 1 The percentage composition of MRE' samples

样品号	基体	铁粉	碳黑
1	100%	0%	0%
2	94%	0%	6%
3	94%	6%	0%
4	67%	33%	0%
5	63%	33%	4%
6	60%	33%	7%

6种样品中, 样品1为纯天然橡胶; 样品2和3分别为仅含单一添加剂碳黑和铁粉的样品; 在样品4、5、6中, 铁粉体积比固定, 碳黑含量逐步上升。

制备磁流变弹性体样品时, 采用传统橡胶工业技术, 对橡胶基体和橡胶助剂进行塑炼后, 添加铁粉和碳黑颗粒混炼至均匀, 制成混炼胶填充到模具中, 置入自制磁热耦合硫化装置中固化成型^[10]。固化过程中调节磁场发生装置的磁感应强度为1T。

2.2 热空气老化试验

为研究材料的热稳定性, 本文对磁流变弹性体样品进行了热空气老化试验。试验时采用热空气老化箱(江都精诚仪器厂), 设定箱内空气温度为70 $^{\circ}\text{C}$, 置样品于箱中48h。在此过程中, 样品会发生老化、分解等化学变化。达预设时间后, 样品取出后静放24h后再进行力学性能测试。

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10672154); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20050358010)

收到稿件日期: 2007-04-27 通讯作者: 龚兴龙

作者简介: 陈琳(1983-), 男, 江苏东台人, 博士研究生, 师承龚兴龙教授, 主要从事电磁流变智能材料方向的研究。

2.3 动态粘弹性测试系统

Dynamic mechanical analyzer (DMA)是比较成熟的粘弹性体动态力学测试系统^[11]。为测试磁流变弹性体在磁场下的力学性能,在英国 Triton Technology 公司的 Tritec 2000 DMA 基础上进行了改进,自研制配备了一个可调范围 0~1100mT 的磁场(如图 1 所示),构成力磁耦合 DMA,从而可以测试材料在磁场中的力学性能。实验中采用剪切模式,通过对样品施加正弦应变,测量其应力的幅值和相位,得出材料的剪切模量和阻尼比。该系统可以测量材料在不同磁感应强度、动态应变和激励频率下的动态力学性能。本文实验在室温中进行,动态剪应变幅值设定为 0.3%,激励频率设定为 1Hz。

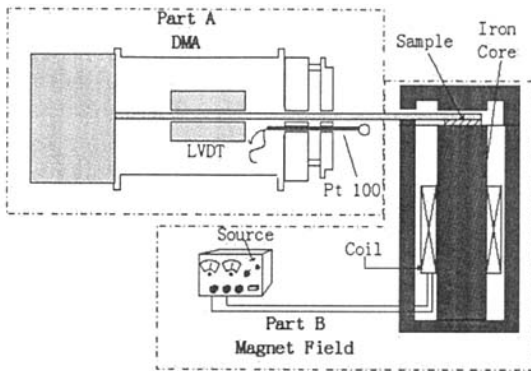


图 1 力磁耦合动态粘弹性测试系统结构示意图

Fig 1 A magnet-mechanics coupled DMA

3 结果与讨论

3.1 磁流变效应

图2和图3分别为磁流变弹性体样品的剪切模量和损耗因子在不同外加磁感应强度中的变化曲线。图中每种类型的数据点都代表不同成分的样品,其系列名称以样品的特征成分(铁粉、碳黑含量)表示。表2为图2和图3中的零场性能和最大磁致性能的数据列表。

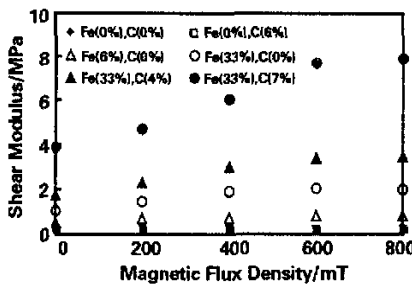


图 2 磁流变弹性体样品在磁场下的剪切模量

Fig 2 Shear Modulus of MREs in different magnetic field

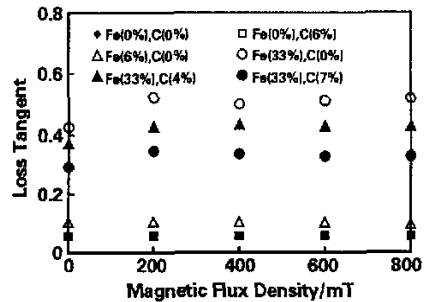


图 3 磁流变弹性体样品在磁场下的损耗因子

Fig 3 Loss tangent of MREs in different magnetic field

从图2中可以看出,不含铁粉的样品的模量保持恒定值,不随磁感应强度变化;含铁粉的样品的模量先随外加磁感应强度增大而增加,最终趋近恒定值。在此过程中,磁流变弹性体的内部磁性颗粒被外加磁场磁化产生相互作用力,引起附加模量,随后磁性颗粒达到饱和和磁化强度,相互磁作用力不再变化,磁致模量也不再变化。

表 2 磁流变弹性体样品的零场性能和最大磁致效应

Table 2 MREs' mechanical performance without magnetic field and maximal MR effects

力学性能	G_0 (MPa)	ΔG_{max} (MPa)	$\Delta G_{max} / G_0$	$\tan\delta_0$	$\tan\delta_{max}$
样品					
1 Fe(0%),C(0%)	0.22	<0.01	<5%	0.06	0.06
2 Fe(0%),C(6%)	0.24	<0.01	<5%	0.06	0.06
3 Fe(6%),C(0%)	0.52	0.10	19%	0.10	0.10
4 Fe(33%),C(0%)	1.05	0.92	88%	0.43	0.52
5 Fe(33%),C(4%)	1.76	1.67	95%	0.37	0.43
6 Fe(33%),C(7%)	3.87	1.03	104%	0.29	0.35

结合表2中数据可以看出,铁粉含量是影响磁流变效应的重要因素。当铁粉体积比从6%增至33%时,其相对磁流变效应从19%增至88%。但已有研究表明^[12],随着铁粉含量的升高,其机械强度迅速下降,这严重影响了磁流变弹性体的实际应用。而从本实验中样品3、4、5的测试结果看,加入碳黑后,样品的磁流变效应也显著上升。碳黑在聚合物工业中是一种常见的补强剂^[9],能够增强材料的机械强度。因此,向基体中添加适量的碳黑是提高磁流变弹性体的磁流变效应的一种有效途径。

从图3中可以看出,不含铁粉的样品的损耗因子保持恒定值,不随磁感应强度变化;含铁粉的样品在较低的外加磁感应强度下,其损耗因子随磁感应强度的增大而上升;而当磁感应强度增大到200mT左右,其值开始下降。这是由于当对磁流变弹性体施加磁场时,内部颗粒相互吸引,产生作用力,而此作用力是通过基体来传递的,所以颗粒与基体间的作用力也随之增强,进而导致界面滑移力增大。因此,界面滑移产生的能量损耗也随之升高。随着磁感应强度的进一步增大,颗粒与基体间的作用增强,结合更加紧密,使得界面滑移量相对降低,此时界面滑移产生的能量损耗也随之下降。

再结合表2中数据可以看出, 样品中炭黑含量越高, 其损耗因子越低。这是由于炭黑是一种活性添加剂, 可以使材料内部的网络结构交联得更加紧密, 从而限制了颗粒在其中的滑移, 因而导致材料的损耗因子的降低。对于传统的功能材料^[13], 为了达到减振降噪的目的, 往往都有高损耗因子的要求。之前不少研究者致力于提高材料损耗因子的研究, 提出了通过添加大颗粒填充剂、增塑剂等方法。而基于磁流变弹性体变刚度特性设计的动力吸振器, 降低材料阻尼可大大提高吸振效率^[14]。因此, 通过向基体中添加适量的炭黑, 来制备低损耗因子的磁流变弹性体, 对实现磁流变弹性体的实际应用有着重要意义。

3.2 热稳定性

为研究磁流变弹性体的热稳定性, 本文对3种铁粉含量的相同炭黑含量不同的样品进行了热空气老化试验后, 测试了其力学性能, 并与未老化的标准试样的测试结果进行了比较。

图4为磁流变弹性体样品老化前后在零场下的剪切模量, 图5为磁流变弹性体样品老化前后在外加磁场中剪切模量的最大变化量(绝对磁流变效应), 图6为磁流变弹性体样品老化前后的最大相对磁流变效应。图中圆点表示未老化的标准样品的测试结果, 方点表示经过老化后的样品的测试结果。

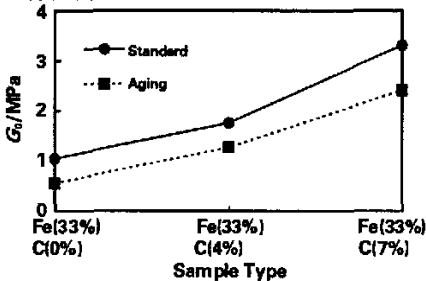


图4 磁流变弹性体样品老化前后零场模量

Fig 4 Zero shear modulus of MRE before and after aging

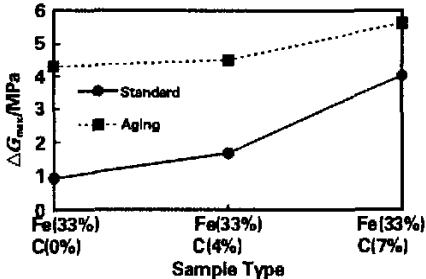


图5 磁流变弹性体样品老化前后绝对磁流变效应

Fig 5 Increment of shear modulus of MREs before and after aging

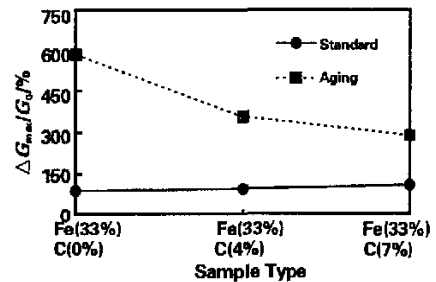


图6 磁流变弹性体样品老化前后相对磁流变效应

Fig 6 Relative increment of shear modulus of MREs before and after aging

从图4中可以看出, 对于不同炭黑含量的各种磁流变弹性体样品老化后, 其零场模量都有所降低, 而此变化量几乎为一恒定值。即磁流变弹性体样品老化前后的零场模量的变化量不受样品中炭黑含量的影响。从图5和图6中可以看出, 随着炭黑含量的增加, 图中两条折线的距离变近, 即样品的绝对和相对磁流变效应在老化前后的变化量都在降低。如无碳黑的磁流变弹性体样品, 其老化前后的相对磁流变效应之差为508%; 而炭黑含量为7%的磁流变弹性体其老化前后的相对磁流变效应之差仅为177%。所以, 磁流变弹性体样品中炭黑含量越高, 其磁流变效应受热空气老化的影响越小。

对于应用在复杂环境下的粘弹性材料, 其必须具备抗老化的能力, 才能够维持材料性能的稳定性。因此, 制备磁流变弹性体时, 向基体中添加适量的炭黑可以显著的提高材料性能的热稳定性。

4 结论

制备了不同炭黑含量的磁流变弹性体, 并实验研究了其磁流变效应和热稳定性, 得出了炭黑对磁流变弹性体力学性能的影响规律: 在制备磁流变弹性体时, 向基体中添加适量的炭黑, 可以:

- (1) 增强磁流变弹性体的磁流变效应;
- (2) 降低磁流变弹性体的损耗因子;
- (3) 提高材料性能的热稳定性。

参考文献:

- [1] Carlson J D, Jolly M R. [J]. *Mechatronics*, 2000, 10: 555-569.
- [2] Rabinow J. [J]. *Technical News Bulletin*, 1948, 32(4): 54-60.
- [3] Ginder J M. [J]. *MRS BULLETIN*, 1998, 23(8): 456-458.
- [4] Jolly M R, Bender J W, Carlson J D. [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1999, 10(1): 5-13.
- [5] Bossis G, Khuzir P. [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2003, 258: 456-461.
- [6] Ginder J M, Nichols M E, Elie L D, et al. Controllable-stiffness components based on magnetorheological elastomers [C]. In *Smart Structures and Materials: Smart Structures*

- and Integrated Systems, Proceedings of SPIE, 2000, 3985: 418-425.
- [7] Jolly M R, Carlson J D. [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1996, 7: 613-622.
- [8] Deng H, Gong X, Wang L. [J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(13): N111- N116.
- [9] 傅 政. 橡胶材料性能与设计应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [10] 陈 琳, 龚兴龙, 江万权, 等. [J]. 功能材料, 2006, 37(5): 703-705.
- [11] 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.
- [12] Chen L, Gong X L, Jiang W Q, et al. [J]. Journal of Materials Science, in press.
- [13] 李法华. 功能性橡胶材料及制品[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [14] Sun H L, Zhang P Q, Gong X L, et al. [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 300: 117-125.

The influence of the carbon black on the mechanical performance of magnetorheological elastomers

CHEN Lin, GONG Xing-long

(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 elastomers (MR elastomers or MREs) are a kind of intelligent materials whose mechanical performances can be controlled by an applied magnetic field. In this paper, MREs with different contents of carbon black are prepared. Their MR effects and thermal stability are experimentally studied. The influence of the carbon black on the mechanical performance of MREs is discussed. Results show that using carbon black in preparation is able to improve the MR effects, reduce the loss tangent, and enhance the thermal stability.

Key words: magnetorheological elastomers; carbon black; mechanical performance