

Influence of Damping Properties on Magnetorheological Elastomers Based on Soft Magnetic Particles

Miao Yu, Ben-xiang Ju, Si-qi Wang, Xue-qin Liu

The Key Lab for Optoelectronic Technology and Systems, Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing, China, 400044

Email:jubenxiang@cqu.edu.cn

Abstract: The study on magnetorheological elastomers(MRE) is focused on the Magnetorheological effect since the inception of MRE, and very few involved in damping properties. In this paper, make use of two different soft magnetic particles in MRE preparation. A self-modified DMA is setup to evaluate their dynamic damping properties. Analysis damping properties of MRE prepared by different soft magnetic particles under different frequency and different strain with variation of magnetic field. Results show that frequency, dynamic strain, magnetic field and the different soft magnetic particles can impact the damping properties of MRE in different degrees.

Keywords: magnetorheological elastomer; damping properties; soft magnetic particles

软磁颗粒对磁流变弹性体阻尼性能的影响

余森, 居本祥, 王四棋, 刘雪琴

重庆大学 光电工程学院, 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆, 中国, 400044

Email:jubenxiang@cqu.edu.cn

摘 要: 自磁流变弹性体诞生以来, 针对磁流变弹性体的研究主要是侧重其磁流变效应展开的, 很少涉及磁流变弹性体的阻尼性能的研究。本文采用两种软磁性颗粒制备硅橡胶基的磁流变弹性体, 通过改进的动态机械分析仪来测试所制备样品的动态阻尼性能, 分析不同的软磁性颗粒制备的磁流变弹性体在不同的频率下以及不同的应变下随磁场强度变化的阻尼性能。最后的实验结果表明不同软磁颗粒制备的磁流变弹性体在不同频率、动态应变、磁场变化都会对磁流变弹性体的阻尼性能产生不同程度的影响。

关键词: 磁流变弹性体; 阻尼特性; 软磁颗粒

1 引言

磁流变材料是一类具有流变特性的智能材料, 在外加磁场的作用下, 其流变特性可以发生连续、迅速、可逆的变化[1~2]。

正是由于磁流变弹性体有着这样优良的特性, 目前磁流变弹性体在一些变刚度变阻尼器件中得到了应用, 美国福特汽车公司已经申请了使用磁流变弹性体的汽车悬架套筒专利[3], Ginder 等人利用磁流变弹性体构造了一种可调吸振器[4], 中国科技大学龚兴龙教授团队研制了基于磁流变弹性体的调频吸振器[5], 重庆大学的余森教授申请了基于磁流变技术的并联式

隔振缓冲器[6]。

而在磁流变弹性体的研究领域, 绝大多数基础研究和器件设计是针对模量变化展开的, 虽有一些的研究人员开始研究磁流变弹性体的阻尼性能, 但是目前还没有形成统一的共识。磁流变弹性体应用于吸振器目前已经取得了很好的效果, 但是磁流变弹性体的高阻尼影响了吸振器的效率。已有研究表明磁流变弹性体的阻尼对能量的转移效率的影响很明显, 阻尼越大能量的转移效率越低。但是目前对于这方面的研究, 不论是理论还是实验方面都很缺乏。另外磁流变弹性体将粘弹性材料作为基体、将金属颗粒作为掺杂物组成的复合材料, 其本身就是一种优异的阻尼材料[7], 所以对其阻尼特性的研究和分析是具有重要的工程应用价值和理论意义。

国家自然科学基金重点资助项目(50830202); 教育部高等学校博士学科点科研基金(20090191110011) 中央高校基本科研业务费科研专项自然科学基金类项目(CDJZR10120005)。

2. 实验设计方案

2.1 实验设计

本文使用两种软磁颗粒制备了三种不同磁流变弹性体，第一种使用羰基铁粉作为填充颗粒，第二种使用羰基镍粉，第三种使用两种软磁颗粒的同等质量比混合制备磁流变弹性体。通过动态机械分析仪测试制备样品的阻尼性能，在固定频率 10Hz 下，测试阻尼在不同的应变下随磁场的变化关系；另外在固定应变为 0.2%，测试阻尼在不同的频率下随磁场的变化关系。分析不同的软磁颗粒制备的磁流变弹性体在不同应变、频率、磁场下的变化关系。

2.2 实验试剂与装置

羰基铁粉：平均粒径 6.05 微米，羰基镍粉：平均粒径 9.44 微米，吉林吉恩镍业股份有限公司；硅油：二甲基硅油，粘度 200 厘丝；704 硅橡胶：江苏溧阳市宏大有有机硅胶厂。磁场发生装置：牌号 N35 钕铁硼永磁体，尺寸 100×100×50mm，宁波江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。

2.3 样品的制备

磁流变弹性体的制备过程中，先将精确称量的羰基铁粉或羰基镍粉加入到二甲基硅油中充分混合后，再将 704 硅橡胶加入到羰基铁粉或羰基镍粉与硅油的混合物中，经混合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 680mT，经预结构化 2 小时后，放在常温下固化约 24 小时，便可以制备出磁流变弹性体实验样品。

Table1.The composition of MR elastomer samples(mass percent)

表 1.流变弹性体样品的组成（质量百分比）

样品	软磁颗粒	硅橡胶	硅油
1	羰基铁粉 65%	20%	15%
2	羰基镍粉 65%	20%	15%
3	羰基铁/镍粉(1: 1)65%	20%	15%

3 磁流变弹性体动态阻尼性能研究

3.1 实验测试系统

本文共制备了三种磁流变弹性体样品，主要是为了研究在同等组分下，不同的软磁性填充颗粒对于磁流变弹性体的动态阻尼性能的影响。材料的动态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。因为磁流变弹性体可以作为一种隔振缓冲的核心部件，所以动态性能比静态性能更能反映实际使用条件下的性能。使用的动态性能测试系统是对传统的动态机械分析仪(DMA)是进行改造的系统，DMA 是比较成熟的粘弹性体动态力学测试系统，但传统的 DMA 不能进行材料随磁场变化的性能测试，为此在英国 Triton Technology 公司 Tritec 2000 DMA 基础上配置了一个可调范围为 0~1100mT 的电磁场，这样便可以测试磁流变弹性体的动态性能随磁场的变化关系[8]。

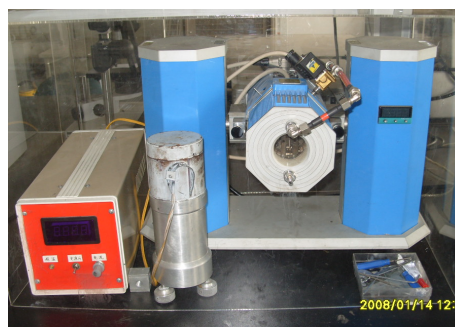


Figure1. Measurement system

图 1.测试系统

3.2 动态阻尼性能的分析

磁流变弹性体属于一种复合材料，根据复合材料理论，复合材料的阻尼特性有两个方面的来源，一是各种组成物的本征阻尼；二是由于组成材料自身的模量差异，使得材料在受到外力时会产生不同的形变而发生界面滑移，界面滑移会增加能量的消耗，其中的能量消耗是材料产生阻尼的根本原因[7]。下面主要对在不同测试频率、应变水平和测试磁场下磁流变弹性体的动态阻尼性能进行分析。

3.2.1 动态应变对磁流变弹性体阻尼性能的影响

实验中，使用两种不同的软磁颗粒（羰基铁粉与羰基镍粉）制备三种同组分样品，在固定激励频率为 10Hz

的条件下, 分别在动态应变为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%时分别对三种样品进行阻尼性能测试, 测试的结果如图 2 所示:

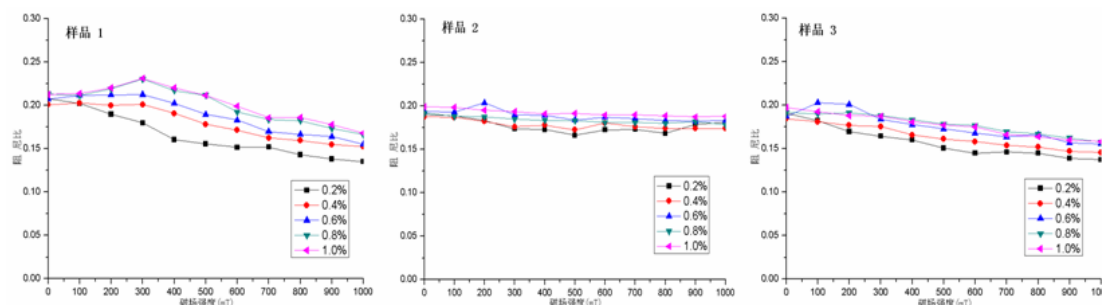


Figure2.Relationship between dynamic strain and damping properties

图 2.动态应变与阻尼性能的关系

从样品 1 的图中可以看出羰基铁粉颗粒的磁流变弹性体动态应变达到 0.4%后的阻尼比随着磁场增大呈现先增大后减小的趋势, 在磁场强度为 300mT 时, 动态应变下阻尼比出现峰值, 此后再随着磁场的增强不断而降低, 当应变为 0.2%时, 随着磁场强度增强阻尼比一直呈现下降的趋势; 当动态应变升高到 0.8%后, 磁流变弹性体的阻尼性能就不再受动态应变的影响。样品 2 是羰基镍粉颗粒的磁流变弹性体, 阻尼比的随着动态应变的变化可以分为两个阶段, 在动态应变小于 0.8%时, 阻尼比会随着磁场的增强出现波动变化, 而当动态应变达到了 0.8%时, 阻尼比随磁场增强

以微弱的速度均匀的降低, 并且保持了相同的变化趋势。样品 3 的软磁颗粒是羰基铁粉与羰基镍粉按质量比 1:1 混合, 阻尼比随着应变的增大出现了同样的变化方式, 同是随磁场的增强阻尼比不断的降低。

3. 2. 2 频率对磁流变弹性体阻尼性能的影响

固定动态应变为 0.2%, 分别在激励频率为 10Hz、20Hz、30Hz、40Hz 时对三种磁流变弹性体进行研究。测试的结果如图 3 所示。

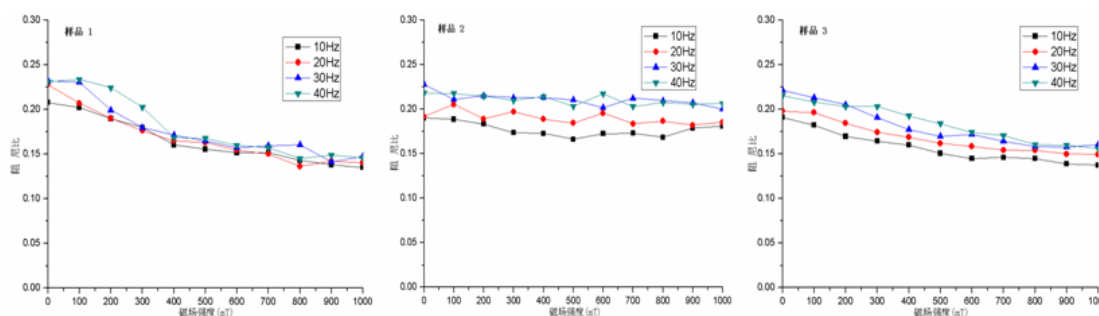


Figure3.Relationship between frequency and damping properties

图 3.频率与阻尼性能的关系

样品 1 在固定动态应变的情况下, 随频率的增加阻尼比出现了略微的上升, 并且在磁场不断增强的条件下磁流变弹性体的阻尼比一直呈现下降的趋势, 在

磁场强度为 400mT 时看作一个转折点, 低于 400mT 阻尼比的变化梯度较大, 高于 400mT 时变化梯度较小。样品 2 明显的看出阻尼比随着磁场强度的增加不断上

升,达到 30Hz 以后磁流变弹性体的阻尼比不再随着频率的变化,并且样品 2 在磁场不断增加的过程中阻尼出现了波动变化,即随磁场强度的变化趋势不明显。样品 3 有明显的随频率的增大阻尼比不断上升的变化,并随着磁场的增强在各频率下阻尼比均出现平稳下降的趋势。

两种不同软磁颗粒制备的磁流变弹性体样品,在不同的动态应变与频率影响下,磁流变弹性体的损耗因子出现了不同的变化趋势。作为复合材料磁流变弹性体的能量损耗主要来源于软磁颗粒与基体之间的相

对运动[9]。软磁颗粒与硅橡胶不属于同一类物质,因此存在结合的紧密性的问题,在不同的动态应变实验中,应变增加时,颗粒与基体之间的结合会变弱,因此能量的损耗会增加,相应的阻尼也就会变大,但随着磁场的增强,软磁颗粒之间的作用力会增强,会对基体的束缚能力增强,颗粒与基体之间的相对运动越少,导致在磁场增加时造成阻尼存在一定的下降趋势[10]。另外从羰基铁粉与羰基镍粉的微观形态分析如图 4 所示。

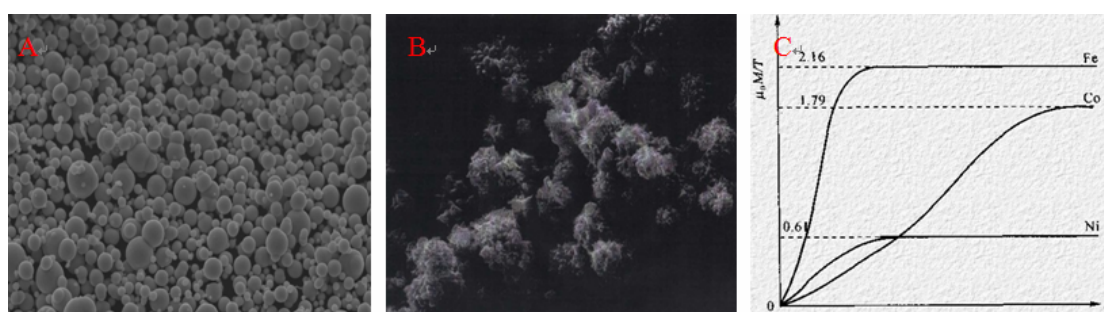


Figure4.Soft magnetic particles and magnetization curve(A: carbonyl iron powder B: carbonyl nickel powder C: magnetization curve)

图 4.软磁颗粒及磁化曲线 (A:羰基铁粉颗粒 B:羰基镍粉颗粒 C:磁化曲线)

羰基铁粉颗粒呈现圆球状颗粒,而羰基镍粉具有黑色珠链状,独特的三维链状超精细颗粒网格结构,而且从图 4 C 的软磁颗粒磁化曲线看出,铁颗粒的饱和磁化强度为 2.16T,而镍粉的饱和磁化强度却只有 0.61T,正是由于羰基镍粉的独特结构比羰基铁粉的球型颗粒更易与基体结合,另外羰基铁粉的磁化强度比羰基镍粉高很多,所以颗粒在磁场的作用下对相互作用力更加敏感,造成羰基铁粉比羰基镍粉制备的磁流变随外界实验条件变化的更为显著。

4 结论

本文用不同的软磁颗粒制备的磁流变弹性体,使用改进的 DMA 测试阻尼性能,实验结果表明:

(1)在固定频率下,动态应变增加,三种磁流变弹性体的阻尼比均呈现了上升的趋势,通过数据分析得出羰基铁粉制备的磁流变弹性体阻尼比的变化最大,且随磁场的梯度变化趋势比羰基镍粉颗粒的磁流变弹性体或羰基铁粉与羰基镍粉混合的磁流变弹性体更为明显。

(2)在固定动态应变,在频率不断增加的过程中,磁流

变弹性体的阻尼比出现了上升的趋势,羰基镍粉的磁流变弹性体各频率下的阻尼比随磁场增强只出现了上下的波动变化,而羰基铁粉与混合颗粒制备的磁流变弹性体阻尼比随磁场的增强均出现不断下降的趋势。

5 致谢

感谢中国科学技术大学材料力学行为与设计重点实验室龚兴龙教授及其研究团队为本论文中样品进行动态力学性能测试。

References (参考文献)

- [1] J.David Carlson, Mark R.Jolly. MR fluid, foam and elastomer devices [J]. Mechatronics, 2000, 10: 555-569.
- [2] Jianxiao Wang, Guang Meng. Research advances in magnetorheological elastomers[J]. Journal of Functional Materials, 2006, 5 (37): 706-709.
汪建晓, 孟光. 磁流变弹性体研究进展[J]. 功能材料, 2006, 5 (37): 706-709.
- [3] Ginder J M, Nichols M E, Elie L D, et al. Controllable-stiffness components based on magnetorheological elastomers [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 39(85): 418-425.
- [4] Ginder J M, Schlotter W F, Nichols M E. Magnetorheological Elastomers in Thenable Vibration Absorbers[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 43(31): 103-110.

- [5]Huaxia Deng, Xinlong Gong, Peiqiang Zhang. Tuned vibration absorber based on magnetorheological elastomer [J]. Journal of Functional Materials, 2006,5 (37) :790-792.
邓华夏, 龚兴龙, 张培强. 磁流变弹性体调频吸振器的研制[J]. 功能材料, 2006, 5 (37) : 790-792.
- [6]Miao Yu, Xiaomin Deng, Honghui Zhang, Changrong Liao. Isolation-buffer in parallel based on magnetorheological elastomers [P]. patent NO.101126430A, 2007.
余 淼, 董小闵, 张红辉, 廖昌荣. 基于磁流变技术的并联式隔振缓冲器[P]. 申请专利号:CN200710092716.9 2007.
- [7]Lin Chen. The Development and Mechanical Characterization of Magnetorheological Elastomers[D].University of Science and Technology of China,2009.
- 陈琳. 磁流变弹性体的研制及其力学行为表征[D]. 中国科学技术大学, 2009.
- [8] Xinlong Gong, Jianfeng Li, Xianzhou Zhang, Peiqiang Zhang. Development of testing system of magnetorheological elastomers[J]. Journal of Functional Materials, 2006, 5 (37) :733-735.
龚兴龙, 李剑锋, 张先舟, 张培强. 磁流变弹性体力学性能测量系统的建立[J]. 功能材料, 2006, 5 (37) :733-735.
- [9]T.L.Sun, X.L.Gong, et al. Study on the damping properties of magnetorheological elastomers based on cis-polybutadiene rubber [J]. Polymer Testing,2008, 27:520-526.
- [10]Payne A R. The dynamic properties of carbon black-loaded natural rubber vulcanizates. Part I [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1962, 6(19):53-57.