

磁流变弹性体力学性能测量系统的建立*

龚兴龙,李剑锋,张先舟,张培强

(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: 磁流变弹性体的性能参数很多。其中磁流变弹性体的磁控性能部分是这种材料的主要参数。然而现在国际上对磁流变弹性体的力学性能的测量缺乏标准性。不同的测试系统得到的结果差别也很大。本文建立了一套磁流变弹性体力学性能的测试系统。使用了经过改造的,可以实现力磁耦合的DMA动态测试系统和自制的动态力学性能测试系统,能够全面分析磁流变弹性体的磁致动态力学性能;改造了具备力磁耦合功能的电子拉力机,可以测试磁流变弹性体在不同磁场强度和应变率情况下的准静态模量;并建立了传统的标准橡胶测试手段,可以对磁流变弹性体的强度、硬度、抗疲劳性和回弹性等多项机械性能进行较为完整的测量。这一系列测试系统的建立,为磁流变弹性体的性能测试提供了较为全面的评估体系,为磁流变弹性体的性能突破和实用化研究打下了基础。

关键词: 磁流变弹性体;力学性能;测试系统

中图分类号: O631;TB381

文献标识码: A

文章编号: 1001-9731(2006)05-0733-03

1 引言

磁流变弹性体(MR Elastomers)是磁流变材料的一个新的分支。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^[1-4]。

磁流变弹性体的性能参数很多。如:磁控动柔量或动模量、拉伸强度、硬度等。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,表现为力和磁耦合场下的材料特性。而它的强度、硬度、回弹性、抗疲劳等常规机械性能也是不能忽视的性能。磁流变弹性体的性能测试目前没有统一的标准,不同系统测量的结果误差很大^[5]。而磁流变弹性体的性能测试却是一个不可忽视的问题,因为没有可靠的性能测试分析,就不能对磁流变弹性体的性能进行评价。因此建立一套完整可靠的磁流变弹性体测试系统是一个亟待解决的问题。

本文尝试建立一套磁流变弹性体性能测试系统。在测量磁流变弹性体的零场和磁致准静态模量方面,建立并初步完善了具备力磁耦合功能的电子拉力机,

可以测试磁流变弹性体在不同磁场强度和应变率情况下的准静态模量。对于磁流变弹性体在零场和不同磁场强度下的动态复模量的测量,使用了经过改造的,可以实现力磁耦合的动态测试系统,能够全面测试磁流变弹性体的磁致动态粘弹性性能,如不同频率加载下的磁致储能模量和损耗因子等。此外,利用传统的橡胶测试手段,对磁流变弹性体的强度、硬度、抗磨耗性、抗疲劳性和回弹性等多项机械性能都建立了相应的测量系统。这一系列测试系统的建立,为磁流变弹性体的性能测试提供了较为全面的评估体系,为磁流变弹性体的性能突破和实用化研究打下了基础。

为说明本文所涉及系统,制备了含羰基铁粉70%、硅油10%和硅橡胶20%(以上均为质量比)的磁流变弹性体样品供测试分析。

2 静态力学性能测试系统

材料的静态力学行为是指材料在恒定或单调递增应力(或应变)作用下的行为。静态力学性能测试系统主要对材料进行拉伸、压缩、弯曲、剪切、撕裂、剥离等常规的力学性能的测试。本文所用的静态力学实验机是江苏省江都市精诚测试仪器厂生产的JPL-2500N多功能电子拉伸机。为了测试磁流变弹性体在磁场作用下的力学性能的变化,自行研制配备了变化范围0~600mT的磁场装置,这样该系统不仅能测量磁流变弹性体的各种强度,还可以测试磁流变弹性体在磁场下的力学性能的变化。

图1是利用该系统所测磁流变弹性体样品的静态剪切模量。

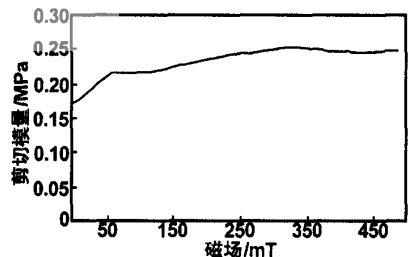


图1 静态剪切模量随磁场的变化

Fig 1 The static shear modulus versus magnetic flux
结果显示磁流变弹性体的静态剪切模量随着磁场的增大而增大,从零场的0.17MPa最多变到300mT

* 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:龚兴龙 (1966—),男,浙江嘉善人,教授,博士生导师,主要从事磁流变材料和振动控制的研究。

的 0.25MPa, 绝对改变量为 0.08MPa, 相对改变量为 47.1%。

3 动态性能测试系统

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。它不同于材料的静态力学行为,后者是指材料在恒定或单调递增应力(或应变)作用下的行为。材料的疲劳行为也属动态力学行为之一,但疲劳测试通常是在较高的应力水平(例如在材料断裂强度的 50%以上)下进行的,而所述的动态力学分析则一般在很低的应力水平(远低于材料的屈服强度)下进行,所得到的基本性能参数是材料的动态刚度与阻尼^[6]。对于在振动条件下使用的材料或制品,它们的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性能,因为磁流变弹性体的一个重要的应用就是作为减振材料,因此测试它的动态力学性能是十分必要的。

本文建立的磁流变弹性体的动态力学性能测试系统,主要测试磁流变弹性体的剪切储能模量 G' 和损耗因子 $tg\delta$ 。所建立的测试系统有两个:一个是对传统的动态机械分析仪(DMA)是进行改造的系统;另一个是我们自研制的一套测试系统。它们可以分别测量磁流变弹性体在低频和高频时的动态性能。

3.1 低频测试系统

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(如适度、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的性能。图 2 是该系统的实物图。

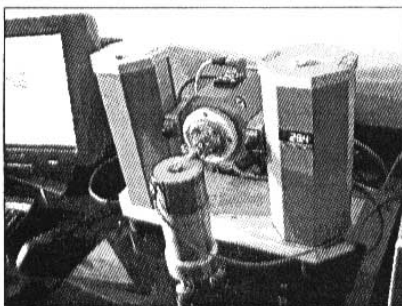


图 2 低频测试系统

Fig 2 Measurement system for low frequency

图 3 是利用该系统所测磁流变弹性体样品的动态剪切模量和损耗因子在不同测试频率下随磁场的变化。从图 3 中可以看出样品的剪切储能模量随磁场的

改变十分明显,相对变化率将近 2 倍,样品的磁流变效应很显著。而且,随着频率的增大,剪切储能模量也增大,但不同频率间的增量几乎相同。而损耗因子改变很少。

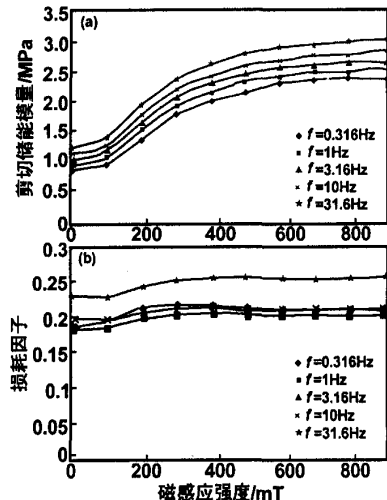


图 3 磁流变弹性体的低频特性

Fig 3 The MR elastomer's properties at low frequency

3.2 高频测试系统

DMA 的测试系统是得到世界公认的,但是它的测试频率不能够很高。为获得全频段的动态特性,可先测量不同温度下相同频段内的曲线,再利用时-温叠加原理,通过水平位移和垂直位移把它们转换为宽阔频率范围内的主曲线。利用低温等效高频的原理,用这种方法也可获得磁流变弹性体在高频时的特性。为方便测量,另外自研制了一台测试仪^[3],可直接测量磁流变弹性体在高频时的特性。图 4 是其示意图。它的主要原理是:利用磁流变弹性体和一个集中质量组成一个单自由度系统,通过给系统基础激励,测量系统的响应,分析得出系统的传递函数,而传递函数就反映了磁流变弹性体的动态力学性能。如果我们把这套系统放在磁场中就得到了力磁耦合的动态性能。

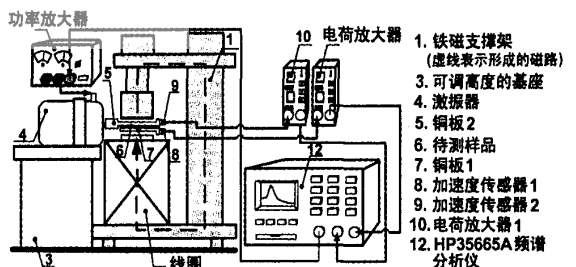


图 4 高频测试系统示意图

Fig 4 Measurement system for high frequency

图 5 给出了用这套测试系统测试的磁流变弹性体样品的结果,分别为在磁场下的传递函数幅频曲线、相频曲线、计算出的刚度曲线及损耗因子。图 5(a)为幅频曲线,图 5(b)为相频曲线。虚线和实线分别反映了该磁流变弹性体在 0 和 274mT 的磁感应强度下的振

动特性。从图中可以发现此幅频曲线和相频曲线的形状和单自由度振动系统的理论曲线基本一致,这说明事先的假设(系统是单自由度系统)是合理的。此外可以很明显地看出:随着磁场的增加系统的共振频率向高频方向发生了偏移,说明材料的剪切模量在磁场的作用下增大。然而加磁场前后传递函数曲线的峰值半功率带宽与共振频率比值的大小变化不大,这说明加

磁场后样品的损耗因子变化很小。图 5(c)和(d)分别为剪切储能模量-频率曲线图和损耗因子-频率曲线图,它们是根据系统的传递函数计算得到的。从图中可以看出在一定范围内剪切储能模量随频率增加而增加,这与典型橡胶的粘弹性是一致的。在磁感应强度为 274mT 的磁场作用下,剪切储能模量比无磁场下明显增大。而材料损耗因子随磁场变化不大。

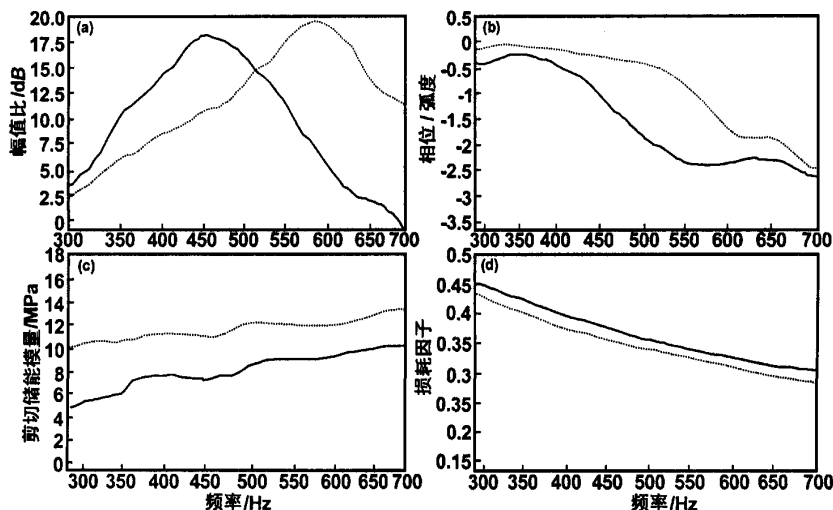


图 5 磁流变弹性体的高频特性

Fig 5 The MR elastomer's properties at high frequency

4 机械性能测试系统

磁流变弹性体作为一种智能橡胶,必须具备普通橡胶的机械性能,为此,我们建立了一套包括硬度计、冲击弹性试验机、磨耗试验机、橡胶疲劳龟裂试验机和老化箱的橡胶常规测试系统,用来评价研制的磁流变弹性体的硬度、回弹、磨耗、疲劳性能和老化等性能。

5 结论

本文建立了一套磁流变弹性体的性能测试系统,测量磁流变弹性体的准静态、低频和高频时的力学性能及不同磁场下相应的磁流变效应以及它们的机械性能,为磁流变弹性体的性能测试提供了较为全面的评价体系,为磁流变弹性体的性能突破和实用化研究打下了基础。

致谢:感谢中国科学院“百人计划”对本课题的大力支持!

Development of testing system for properties of magnetorheological elastomers

GONG Xing-long, LI Jian-feng, 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: Among the properties of magnetorheological (MR) elastomers, the magnetic-induced mechanical property is the most important. However there is little standard testing system reported. In this paper, a series of testing system for properties of MR elastomers is setup. Traditional DMA (dynamic mechanical analyser) is modified to measure the magnetic-induced dynamic properties at low frequency. Testing system is also developed to measure the magnetic-induced dynamic properties at high frequency. Electronic pull test machine is modified to measure the magnetic-induced static properties and the other intensity parameters. Some other testing machines are also setup to measure the mechanical properties, such as hardness, elasticity, abrasion, fatigue and aging properties. The testing system provides a useful base for the study of MR elastomers.

Key words: testing system; mechanical property; magnetorheological elastomer

参考文献:

- [1] Jolly M R, Bender J W, Carlson J D. [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1999, 10(1): 5-13.
- [2] Lokander M, Stenberg B. [J]. Polymer Testing, 2003, 22: 677-680.
- [3] Gong X L, Zhang X Z, Zhang P Q. [J]. Polymer Testing, 2005, 24(5): 669-676.
- [4] Hu Y, Wang Y L, Gong X L, et al. [J]. Polymer Testing, 2005, 24(3): 24-329.
- [5] Demchuk S A, Kuz'min V A. [J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2002, 75(2): 396-400.
- [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.
- [7] Bellan C, Bossis G. [J]. International Journal of Modern Physics B, 2002, 16(17-18): 2447-2453.
- [8] Carlson J D, Jolly M R. [J]. Mechatronics, 2000, 10: 555-569.
- [9] Davis L C. [J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85(6): 387-396.