

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.01.002

# 有场制备的磁流变弹性体压缩弹性模量测试分析\*

高春甫, 石玲玉, 张 广\*, 贺新升, 干健峰, 潘仕合

(浙江师范大学 机械能与测控技术研究所, 浙江 金华 321004)

**摘要:**针对磁流变弹性体压缩弹性模量随磁场变化的问题,在磁场存在的环境下制备出其材料配比分别为羟基铁粉为 108 g,硅橡胶为 28 g,硅油为 18 g 的磁流变弹性体磁流变弹性体,在压缩应变  $\varepsilon = 2.6\%$  的情况下分别对磁场方向与磁流变弹性体颗粒链压缩方向平行和垂直的情况下建立了数学分析模型。对磁流变弹性体的压缩弹性模量进行了理论分析,并通过实验印证了理论分析的准确性。研究表明,加载磁场方向与磁流变弹性体内部颗粒链压缩方向平行的情况下,材料内部磁致压缩力随着磁感应强度的增强而非线性增大;加载磁场方向与磁流变弹性体内部颗粒链压缩方向垂直的情况下,材料内部磁致压缩力随着磁感应强度的增强而非线性减小。

**关键词:**磁流变弹性体;颗粒链;压缩弹性模量;磁致压缩力

中图分类号:TH145

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)01-0006-04

## Test and analysis of the compressive elastic modulus of the magnetorheological elastomers prepared by the field

GAO Chun-fu, SHI Ling-yu, ZHANG Guang, HE Xin-sheng, GAN Jian-feng, PAN Shi-he  
(Institute of Machinery and Measurement - control Technology, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of the change of the elastic modulus of the magneto rheological elastomer with the magnetic field, magneto-rheological elastomers was prepared in the present of a magnetic field, ratio of the material are hydroxyl iron powder is 108 g, silicone rubber is 28 g and the silicone oil is 18 g. The mathematical analysis model was established in the direction of magnetic field with magnetorheological elastomer particles chain compression direction parallel and vertical respectively in the case of compressive strain  $\varepsilon = 2.6\%$ . Theoretical of the compressive elastic modulus of magnetorheological elastomers and by confirming the accuracy of theoretical analysis. The results indicate that under the condition of the loading direction of the magnetic field with magnetorheological elastomers internal particles chain compression parallel, the magnetic force increases nonlinear in the material with the increase of the magnetic induction intensity. Under the condition of the loading direction of the magnetic field with magnetorheological elastomers internal particles chain compression vertical, the magnetic force decreases nonlinear in the material with the increase of the magnetic induction intensity.

**Key words:** magnetorheological elastomers; particle chain; compressed modulus of elasticity; magnetic compression force

## 0 引 言

磁流变弹性体<sup>[1]</sup>是磁流变液的固体表现形式,主要是由导磁性能良好的微米级铁磁性颗粒分散到橡胶里面,代替磁流变液中的基载液,其内部的铁磁性颗粒不会随着时间而发生结合或者沉降,因此,在实际应

用中不必添加保持磁流变材料在工作位置的密封装置,具有良好的稳定性能<sup>[2-3]</sup>。

与磁流变液不同的是磁流变弹性体在外加磁场作用下其弹性模量会发生变化<sup>[4-5]</sup>,并且能随外加磁场强度的改变而发生变化,具有高度可控性,由于其刚度/阻尼可控、剩磁小性质可逆、物化性质稳定不易变质、反应灵敏响应迅速、结构设计简单、制备成本相对较低

收稿日期:2016-08-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275483);浙江省自然科学基金资助项目(LY13E050014)

作者简介:高春甫(1965-),男,吉林公主岭人,博士,教授,主要从事智能材料、机电设备检测与控制、设计及自动化的研究。E-mail:cfhao2007@zjnu.cn

廉等一系列独有的优点,磁流变弹性体作为智能材料的一个重要的新分支,有着十分广阔的应用前景和应用价值<sup>[6-8]</sup>。因此,有必要对其力学特性进行深入研究,特别是对作为其主要力学特征的压缩弹性模量的磁场强度特性的理论研究更加有意义。

本研究针对磁流变弹性体压缩弹性模量随磁场变化的问题,对磁流变弹性体的压缩弹性模量进行理论分析,并通过实验印证理论分析的准确性。

## 1 磁流变弹性体的有场制备

磁流变弹性体的制备方式可以分为无场制备和有场制备,有场制备是指在外加磁场的帮助下将磁流变液均匀地混合在橡胶里面,因此其内部的铁磁性颗粒按照一定的方向有规则地排列,称之为各向异性磁流变弹性体,这种方式制备的磁流变弹性体具有更加明显的磁流变效应以及磁致模量的变化,因此笔者的研究对象是有场制备下的具有各向异性的磁流变弹性体<sup>[9]</sup>。

有场制备下磁流变弹性体,铁磁性颗粒与橡胶的固化过程中所加的磁场强度的大小、磁场方向与颗粒链之间的夹角以及均匀度都会影响成品的性能,因此,为了避免在制备过程中磁场发生较大的波动,将磁铁模具放在具有一定形状的磁回路中,从而保证制备出来的成品内部紧密无空隙,弹性恢复性能良好、形状规则。

制备回路如图 1 所示。

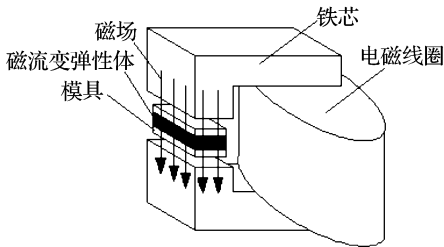


图 1 制备磁回路

本研究按照配比称出所需材料,将铁磁性颗粒、硅橡胶倒入置于烧瓶中,加入适量的添加剂,搅拌半小时使之混合均匀,将混合物带入真空机中反复吸收其中的空气,最后将其倒入准备好的模具进行定型后放入磁回路中固化,待固化完后取出,最终得到性质规则、力学性能均匀的磁流变弹性体。

## 2 磁场方向对磁流变弹性体压缩弹性模量分析

### 2.1 磁流变弹性体链模型

磁流变弹性体在颗粒链方向受压会向四周挤出,颗粒链会发生弯曲,其模型如图 2 所示。

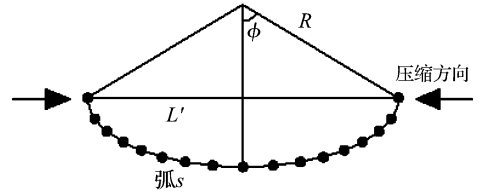


图 2 磁流变弹性体链受压简化模型

设压缩前的长度为  $L, L = S$ , 压缩后的长度为  $L'$ , 压缩量为  $x = L - L'$ , 半弧长所对应的角度为  $\varphi$ , 对应的半径为  $R$ , 则压缩应变  $\varepsilon$  与半弧长角度  $\varphi$  之间的关系可以表示为:

$$2R\sin\varphi = L' = 2R\varphi(1 - \varepsilon) \quad (1)$$

将式(1)中的  $\sin\varphi$  用泰勒公式展开,并取前两项,最终求解上式得出:

$$\varphi = \sqrt{6\varepsilon} \quad (2)$$

磁流变弹性体在受到外部磁场作用时,内部每两个铁磁性颗粒被磁化形成一对磁偶极矩,以它们相距无穷远时的状态为参考点,则其相互作用能为<sup>[10]</sup>:

$$E_{12} = -4\pi\mu_0\mu_1 \left( \frac{\mu_p - \mu_1}{\mu_p + 2\mu_1} \right)^2 a_1^3 a_2^3 \frac{3\cos^2\theta - 1}{s^3} H^2 \quad (3)$$

式中:  $\mu_0$ —真空磁导率;  $\mu_1$ —硅橡胶基体材料的相对磁导率;  $\mu_p$ —铁磁性颗粒的相对磁导率;  $a_1, a_2$ —两颗粒的半径;  $s$ —两颗粒之间的中心距;  $\theta$ —磁场方向与颗粒链之间的夹角;  $H$ —磁场强度。

设:

$a_1 = a_2 = a$ , 且  $\mu_p \gg \mu_1$ , 则两颗粒之间的磁场力可以表示为<sup>[11]</sup>:

$$F_{12} = 3\pi\mu_0\mu_1 \frac{a^2}{4} H^2 \sqrt{(3\cos^2\theta - 1)^2 + \sin^2 2\theta} \quad (4)$$

### 2.2 磁场方向与磁流变弹性体颗粒链方向压缩方向平行

取一对偶极子进行分析,受力分析图如图 3 所示。

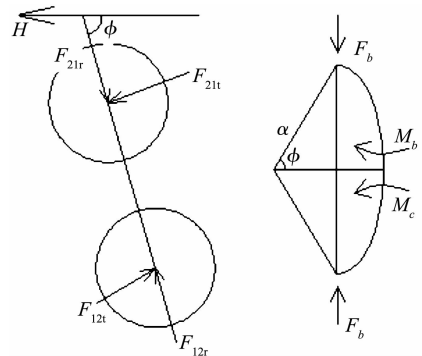


图 3 磁流变弹性体受力分析(平行)

设  $s = 2a$ , 将压力沿着连心线方向和垂直于连心线方向分解,发现沿着连心线方向的两个分力  $F_{12r}, F_{21r}$  相互抵消,垂直于连心线方向的两个力  $F_{12t}, F_{21t}$  形成一个力矩,其力矩大小可以表示为:

$$M = 2aF_{12} = \frac{3}{32}\pi\mu_0\mu_1 a^3 H^2 \sin 2\theta \quad (5)$$

由式(5) 计算得出的力矩大小为在  $2a$  长度的颗粒链的力矩之和, 近似得出链上的力矩分布密度为:

$$M_\rho = \frac{M}{2a} = \frac{3}{64}\pi\mu_0\mu_1 a^2 H^2 \sin 2\theta \quad (6)$$

图 3 所示的平衡力矩  $M_b$  的大小可以表示为:

$$M_b = R \int_0^a M_\rho d\theta = \frac{3}{64}\pi\mu_0\mu_1 a^2 H^2 R(1 - \cos^2 a) \quad (7)$$

由力矩的可移动性以及式(2), 可以得出磁场引起的力的变化与压缩应变的关系为:

$$F_b = \frac{3}{64}\pi\mu_0\mu_1 a^2 H^2 R(1 + \cos \sqrt{6\varepsilon}) \quad (8)$$

### 2.3 磁场方向与磁流变弹性体颗粒链方向压缩方向垂直

取一对偶极子进行分析, 如图 4 所示。

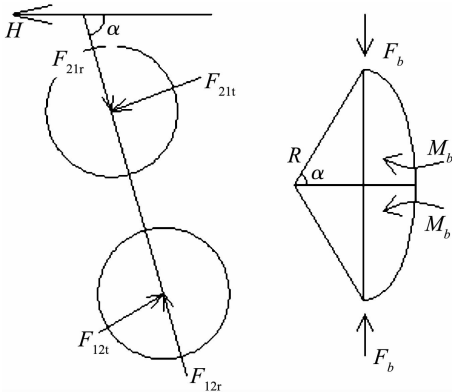


图 4 磁流变弹性体受力分析(垂直)

设  $s = 2a$ , 将压力沿着连心线方向和垂直于连心

线方向分解, 可以发现沿着连心线方向的两个分力  $F_{12r}, F_{21r}$  相互抵消, 垂直于连心线方向的两个力  $F_{12t}, F_{21t}$  形成一个力矩, 其力矩大小以及链上的力矩分布密度同样可以用式(5) 与式(6) 表示。

由图 4 所示的平衡力矩  $M_b$  的大小可以表示为:

$$M_b = R \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi-\varphi} M_\rho d\theta = -\frac{3}{64}\pi\mu_0\mu_1 a^2 H^2 R(1 - \cos^2 \phi) \quad (9)$$

同理, 由力矩的可移动性结合式(2) 可以得出磁场引起的力的变化与压缩应变的关系为:

$$F_b = -\frac{3}{64}\pi\mu_0\mu_1 a^2 H^2 R(1 + \cos \sqrt{6\varepsilon}) \quad (10)$$

假设磁流变弹性体一共有  $n$  条颗粒链, 则可以根据式(8,10) 得出总的磁致压缩力计算公式:

$$F = nF_b \quad (11)$$

进一步得出磁流变弹性体的磁致压缩弹性模量的计算公式:

$$E_1 = \frac{n_b F_b L}{x} \quad (12)$$

考虑无场环境下磁流变弹性体具有初始压缩弹性模量, 因此将初始压缩弹性模量作为参考点, 可以得出磁流变压缩弹性模量的广义公式:

$$E = E_0 \pm E_1 = E_0 \pm \frac{n_b F_b L}{x} \quad (13)$$

式中:  $E_0$ — 无磁场情况下的初始压缩弹性模量;  $F_b$ — 单个颗粒链的磁致压缩力;  $n_b$ — 单位底面积中的颗粒链数目,  $n_b = 1.6 \times 10^9$ 。

以上各参数取值如表 1 所示。

表 1 各参数取值

参数	$\mu_0$	$\mu_1$	$a/\text{mm}$	$B/\text{T}$	$H$	$F/\text{N}$	$n$	$n_b$	$\varepsilon/(\%)$
取值	$4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$	400	0.002	0.35	$0.2/\mu_0$	2.6	289 630	$1.6 \times 10^9$	2.6

对于式(13), 在广义上能较为精确地计算出磁流变弹性体的压缩弹性模量, 在羟基铁粉含量为 75% 时, 该配比下的磁流变弹性体的弹性压缩模量的磁感性强度特性为一个关于二次多项式的函数。

## 3 实验

各材料配比关系如表 2 所示。

表 2 各材料配比关系

材料	羟基铁粉	硅橡胶	硅油
质量/g	108	28	18

笔者按表 2 所示材料配比有场制备磁流变弹性体成品, 其铁粉的质量含量为 75%, 成品外形尺寸为底面积  $A = 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , 厚度  $h = 15 \text{ mm}$ 。

实验平台示意图如图 5 所示。

在实验过程中, 磁感应强度为正, 表示压力方向与磁场方向平行, 反之, 则压力方向与磁场方向垂直, 得出实验数据。

整理数据后, 通过 origin 画图软件分别得出压力方向与磁场方向平行和垂直式的磁致压缩力的磁感应特性曲线图, 如图 6 所示。

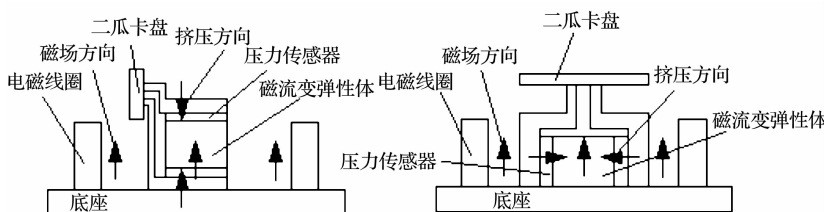


图 5 实验平台示意图

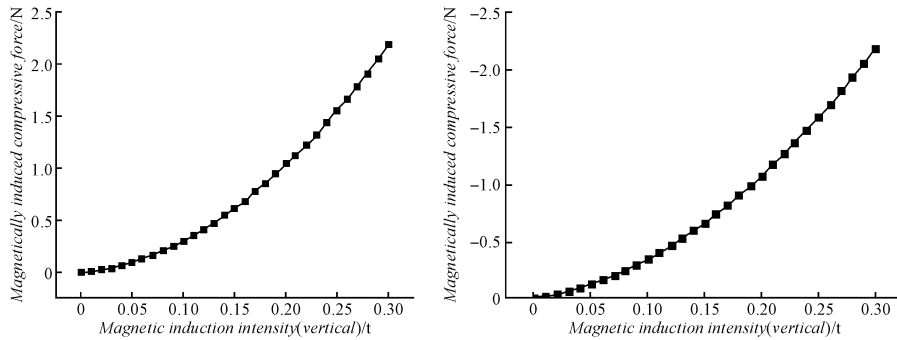


图6 磁流变弹性体磁致压缩力与磁感应强度的关系

图6中可以看出:

(1)当加载磁场方向与外力压缩方向平行时( $B > 0$ )的情况下,磁致压缩力随着外加磁感应强度的增强而增大,原因是当压缩力的方向与磁感应方向平行时,磁流变弹性体内部颗粒之间的压缩力增大,在宏观上表现为磁流变弹性体的弹性压缩模量的变大;

(2)反之,磁致压缩力随着外加磁感应强度的增强而减小,原因是当压缩力的方向与磁感应方向垂直时,磁流变弹性体内部颗粒之间的压缩力减小,在宏观上表现为磁流变弹性体的弹性压缩模量的变小。

## 4 结束语

本研究在理论分析的基础上,对个材料配比分别为羟基铁粉为 108 g,硅橡胶为 28 g,硅油为 18 g 的磁流变弹性体在压缩应变  $\varepsilon = 2.6\%$  的情况下进行弹性压缩模量的磁感应强度特性测试。

测试结果很好地印证了理论分析的准确性,反过来又证明了实验思路的准确性。

其结论如下:

(1)当加载磁场方向与外力压缩方向平行时( $B > 0$ )的情况下,磁致压缩力随着外加磁感应强度的增强而增大;

(2)当加载磁场方向与外力压缩方向垂直时( $B < 0$ )的情况下,磁致压缩力随着外加磁感应强度的增强而减小;

(3)外部磁场感应强度的变化对磁流变弹性体颗粒内部的结构影响非常大,在宏观上表现为弹性压缩模量随着磁感应强度的改变而发生明显的变化。

## 参考文献(References):

[1] 卢秀首,乔秀颖,杨涛,等.磁流变弹性体的制备与应用

研究进展[J].磁性材料与器件,2011,42(6):1-6.

[2] BRIGADOW I A, DORFMANN A. Mathematical modelling of magneto-sensitive elastomers[J]. **International Journal of Solids and Structures**,2003,40(18):4659-4674.

[3] BOSSIS, G. COUELLE, W. NOEL, C. et al. Monitoring Interparticle Distance in Magnetorheological Composites[J]. **International Journal of Modern Physics B**,2007,21(28-29):4868-4874.

[4] SHIGA T, HIROSE M, OKADA K Variable Viscoelasticity damping device[P]. Japan: No. 4-266970,1992.

[5] JOLLY M R. The Magnetoviscoelastic Response of Elastomer Composites Consisting of Ferrous Particles Embedded in a Polymer Matrix[J]. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**,1996,7(6):613-622.

[6] GINDER J M, NICHOLS M E. Magnetorheological Elastomers: Properties and Applications[C]//Part of the SPIE Conference on Smart Materials Technologies. California: Tardiff,1999:13-138.

[7] 李光辉,黄学功,王灵.磁流变弹性体的制备及力学性能研究[J].材料导报B.2013,27(10):36-39.

[8] DENG H X, GONG X L, ZHANG P Q. Tuned vibration absorber based on magnetorheological elastomers[J]. **Journal of Functional Materials**,2006,37(5):790-792.

[9] 吴雨骏.磁流变弹性体触觉传感作动器设计与特性分析[D].南京:南京理工大学机械工程学院,2015.

[10] ROSENSWEIG R E. Ferrohydrodynamics[M]. New York: Cambridge University Press,1985.

[11] JOLLY M R, CARLSON J D, MUNOZ B C. A Model of the Behavior of Magnetorheological Materials[J]. **Smart Materials and Structures**,1996,3(5):607-614.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

高春甫,石玲玉,张广,等.有场制备的磁流变弹性体压缩弹性模量测试分析[J].机电工程,2017,34(1):6-9.

GAO Chun-fu, SHI Ling-yu, ZHANG Guang, et al. Test and analysis of the compressive elastic modulus of the magnetorheological elastomers prepared by the field[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017,34(1):6-9.

《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn