

基于磁流变弹性体导电机理静态压敏特性分析

范亚敏,王传萍,张 森,公绪波,吕 楠,朱绪力

(山东科技大学 机械电子工程学院,山东 青岛 266590)

摘 要:磁流变弹性体是一种新型磁流变材料,由于其内部颗粒结构的特殊性,颗粒体积比非常低的磁流变弹性体能表现出良好的导电性,通过对磁流变弹性体导电机理的研究,并基于颗粒在外加载荷作用下的弹性变形理论,分析了颗粒间电流导路面积的变化,进而推导出磁流变弹性体电导压敏特性理论关系。通过对实验测试结果的处理与分析,得到磁流变弹性体在外加压力作用下通过样品的电流和施加在样品上的电压呈非线性关系,在相同的电压下,流经磁流变弹性体的电流随压力的变化而变化,表现出明显的压敏特性行为。

关键词:磁流变弹性体;导电性;压敏特性;理论模型

中图分类号:TM206

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2016)06-0089-06

Analysis of Static Pressure Sensitive Characteristics of Magnetorheological Elastomer Based on Its Conductive Mechanism

FAN Yamin, WANG Chuanping, ZHANG Sen, GONG Xubo, LÜ Nan, ZHU Xuli

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: As a new type of magnetorheological materials with low particle volume ratio, magnetorheological elastomers (MREs) have good conductivity due to the particularity of its internal particle structure. The pressure-sensitive conductivity of MREs was derived by studying the conductive mechanism of MREs and analyzing the area of conductive path based on elastic deformation of particles under external load. Experimental results show that the flowing current and voltage of the samples are nonlinear relationship under the action of external pressures, while the current flowing through the MREs changes with the change of pressures under the same voltage, displaying obvious pressure-sensitive behaviors.

Key words: magnetorheological elastomers; electric conductivity; pressure sensitive characteristics; theoretical model

磁流变弹性体是在磁流变液的基础上发展而来的一类新型的磁流变智能材料,将磁流变液的分散介质用可固化的高分子材料代替,即可制备出微米级铁磁性颗粒分散于液态高分子聚合物中的复合材料^[1-3]。在外加磁场的作用下铁磁性颗粒磁化形成有序结构并固化在非导电弹性基体中,使其不仅具有良好的力学性能,还具有独特的电学性能,被广泛应用于传感器和智能机构等领域。

目前,国内外学者对于复合体系导电特性的研究方法主要为理论分析和实验测试。随着磁流变弹性体研究的不断深入,研究者发现由于磁流变弹性体内部颗粒结构的特殊性以及内部颗粒具有导电性和导磁性,使 MREs 具备对外界激励(磁场或压力)响应敏感的特性^[4-6]。Bica 等^[7]也对磁流变弹性体的电性能如电阻、电容、电流与磁场、硫化时间、外力等关系进行了较多研究。在应用方面,磁流变弹性体无泄漏、颗粒不易沉降,具有可控、可逆、响应迅速等优点^[8],同时还可以根据应用对材料形状和体积的要求进行加工定做。有研究者认为磁流变弹性体在研究导电机理上具有优势,材料的形态在测量时不发生变化,在理论上能得出较

收稿日期:2016-01-18

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2011EEM005);青岛经济技术开发区重点科技发展计划项目(2013-1-67)

作者简介:范亚敏(1991—),女,山东淄博人,硕士研究生,主要从事摩擦学、智能材料性能研究。E-mail:245706863@qq.com

朱绪力(1970—),男,山东济宁人,副教授,主要从事摩擦学、智能材料性能研究,本文通信作者。E-mail:sdustzhu@163.com

准确的结论,因而近年来成为磁流变材料研究的热点。

本文通过对磁流变弹性体导电机理、压敏导电特性进行深入研究,对研究触觉传感器是一种新的探索^[9-10]。由此可见,对磁流变弹性体导电机理和压敏特性的理论模型进行更深入的研究,并以此作为指导进行实验研究显得尤为重要。

1 MREs 导电机理的研究

磁流变弹性体导电机理分析是对磁流变弹性体压敏特性深入研究的基础,MREs 的导电性具有各向异性,当颗粒体积比较小时,在颗粒链方向磁流变弹性体是导电的,但在垂直于颗粒链方向磁流变弹性体是绝缘的。随着体积比的增加,颗粒链由链状变成网状,导电通道相互交联,在垂直于颗粒链方向,磁流变弹性体也能表现出较弱的导电性。为了探讨磁流变弹性体的导电机理需要进一步研究颗粒链中相邻颗粒之间的导电机理^[11]。

在颗粒链的方向上选取两个相邻颗粒的各一半及周围基体材料的单元体作为分析磁流变弹性体的表征体元的导电特性。表征体元的纵切面如图 1 所示。

磁流变弹性体是由单一的表征体元组成,因此表征体元的平均电场强度、平均电流密度分别等于磁流变弹性体的平均电场强度和平均电流密度。根据宏观的电导率与电场强度和电流密度的关系

$$j = \sigma E, \quad (1)$$

可以得到,磁流变弹性体的导电率等于表征元的电导率。上式中 j 为电流密度, σ 为电导率, E 为电场强度。

电流依次通过颗粒和其间的基体材料,形成一个串联电路。由于颗粒的电导要远远大于基体材料的电导,因此只考虑基体材料的电导作用,将颗粒作为等势体看待。一般认为,电流主要集中在颗粒表面间距最小部位周围的微小面积。

在只考虑基体材料电导的情况下,传导电流密度为

$$j_c = \sigma_f E. \quad (2)$$

由于颗粒的排列使得导流面的厚度很小,磁流变弹性体中导流区的电场强度远大于平均电场强度。厚度很小的聚合物薄膜在强电场作用下,作为电极的两个颗粒之间产生场致隧道电流。隧道电流密度一般用 Fowler-Nordheim 公式表述

$$j_t = AE^2 \exp\left(-\frac{B}{E}\right), \quad (3)$$

其中 j_t 为电流密度, E 为外加电场, A 、 B 是材料的特征常数, A 指电子每秒试图穿越“禁止”区的次数,指数 $-\frac{B}{E}$ 是指定电子穿越能带的可能性。

在颗粒的接触区,隧道电流和传导电流可以同时发生,因此通过导通面积的电流密度为传导电流密度和隧道电流密度之和,表述为:

$$j_i = j_t + j_c = \left[\sigma_f + AE \exp\left(-\frac{B}{E}\right) \right] E. \quad (4)$$

从前面分析可知,表征体元的平均电流密度和整个磁流变弹性体的电流密度相等。继而可得到整个磁流变弹性体的平均电流密度为:

$$j_m = 3\varphi \left[\frac{2A}{h_0^2} E_0 \exp\left(-\frac{h_0 B}{2RE_0}\right) + \frac{\sigma_f}{Rh} \right] r^2 E_0. \quad (5)$$

根据式(1),可以得到磁流变弹性体的理论电导率为:

$$\sigma_m = 3\varphi \left[K_1 E_0 \exp\left(-\frac{K_2}{E_0}\right) + K_3 \right] r^2. \quad (6)$$

可看到磁流变弹性体的电导率与电场强度是非线性的关系。

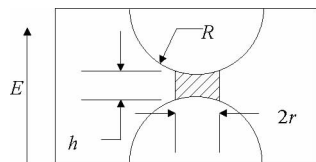


图 1 磁流变弹性体表征体元纵切面

Fig. 1 Characterization of the longitudinal section of MREs

则通过磁流变弹性体的理论电流为

$$I_m = 3S_m \varphi \left[K_1 \frac{u}{H_m} \exp\left(-\frac{K_2 H_m}{u}\right) + K_3 \right] \frac{r^2 u}{H_m} \quad (7)$$

式(7)说明流经磁流变弹性体的电流是由隧道电流和传导电流两部分组成。

2 磁流变弹性体电导的测量

为了得到适当的电导率,本实验的颗粒体积比定为 0.1%,将硅橡胶(Sylgard184,Dow Corning)和羟基铁粉(MPS-MRF-35,江苏天一超细金属粉末有限公司)分别作为基体材料和导磁颗粒来制备磁流变弹性体样品。磁流变弹性体的制备主要包括三个阶段:混合、颗粒结构化和基体材料固化,具体步骤为:

1)将称量好的硅橡胶和羟基铁粉混合机械搅拌 10 min,然后将混合物放入真空干燥箱,抽真空 30 min,除去气泡;

2)将称量好的固化剂加入到混合物中机械搅拌 10 min,放入真空干燥箱,抽真空 30 min,再次除气泡,重复抽真空过程的目的是最大程度地除去磁流变混合液搅拌时混入的空气;

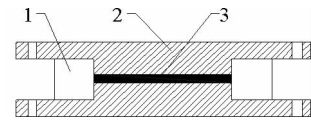
3)将混合物注入到制备好的磁流变弹性体模具中,将模具固定后放入由两块耐高温永久强磁铁构成的静强磁场装置中,磁感应强度为 115 mT;

4)将磁场装置和模具都放入到真空干燥箱中,逐步加热到 120 °C。在 120 °C 保持 60 min,待硅橡胶固化完成后取出模具冷却;

5)待冷却后将挡圈移去,同时端盖始终保持与样品相接触的原始状态进行实验。

MREs 导电性元件模具结构如图 2 所示。

在两个端盖之间施加电压,测量通过磁流变弹性体样品的电流。实验中使用的电源型号为 GPC-3060D 稳压电源三组输出,可调电压从 0 到 30 V,可手动调整,显示精度 0.25 V。电流测量仪表为 DM3064 台式万用表,测量精度 0.1 nA。得到磁流变弹性体样品电阻和流经样品电流分别随电压变化趋势(图 3)。



1—挡圈;2—端盖;
3—封闭在挡圈和端盖中的磁流变弹性体样品

图 2 导电性元件模具结构

Fig. 2 The Structure of Conductive Element

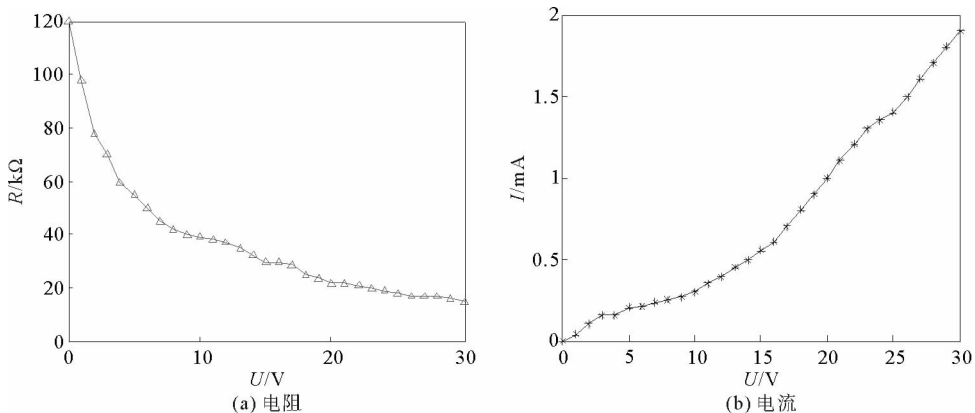


图 3 MREs 的电阻和电流随电压变化趋势图

Fig. 3 Current and electrical resistivity of MREs depending on voltage variation

可以看出磁流变弹性体样品的电流随电压的增加而增加,电阻随电压的增加而下降,在电压值最小时,电阻值下降的速度最快,并表现出明显的非线性关系。

3 磁流变弹性体电导的压敏特性理论分析

导电高分子复合材料中的颗粒在压力的作用下沿着压力的方向距离减小,增加颗粒形成导电通道的几

率,由于磁流变弹性体中颗粒结构已经形成,导电通道已经确定,颗粒间的距离很小,作为导电通道的颗粒间的高分子薄膜难以被继续压缩,因此,颗粒间距减小和导电通道增加的作用在磁流变弹性体的电导变化中不会起到主导作用。颗粒在压力作用下会产生变形,颗粒链中变形集中在颗粒间距最小处,微小的颗粒变形能导致的导流面积较大变化。由此分析可见,由颗粒变形导致的导流面积变化是磁流变弹性体在压力作用下导电性变化的主要原因。

磁流变弹性体内颗粒处于基体材料的包围中,当有压应力作用于磁流变弹性体时,相邻颗粒间的压力可表述为

$$F_p = \pi r_p^2 \sigma \quad (8)$$

两个颗粒在压力作用下会发生变形,其中心正对处由圆弧变为一个微小圆面,实际上在颗粒中间可能有初始接触面积。产生初始接触面积的原因一方面是由于制备过程中磁场力使得颗粒间产生微小塑性变形,另一方面颗粒的外表面并不是理想的球面,具有一定的粗糙度,根据最小能量原理,在颗粒聚集形成颗粒链的过程中能自动定位在三点接触的方向。初始接触面积的存在使得变形不是从 0 开始。应该有满足初始如下关系的初始应力 σ_0 与其对应,由于初始接触面积的影响,颗粒在外加应力作用下的变形为

$$a = (\sqrt[3]{\sigma_0 + \sigma} - \sqrt[3]{\sigma_0}) \sqrt{\frac{3\pi(1-\nu^2)}{2E}} r_p \quad (9)$$

颗粒变形使得电流导通面积增加。如果电流的初始导通面的半径为 r_0 ,在应力的作用下,导通面半径增加为

$$r_1 = r_0 + a \quad (10)$$

将式(9)、(10)代入式(6)中,则在压力作用下磁流变弹性体的理论导电率为

$$\sigma_m = 3\varphi \left[K_1 E_m \exp\left(-\frac{K_2}{E_m}\right) + K_3 \right] (K_4 + K_5 \sqrt[3]{\sigma_0 + \sigma})^2 \quad (11)$$

磁流变弹性体的电流-电压理论关系为

$$I_m = 3S_m \varphi \left[\frac{K_1}{l_m^2} u_m^2 \exp\left(-\frac{K_2 l_m}{u_m}\right) + \frac{K_3}{l_m} u_m \right] (K_4 + K_5 \sqrt[3]{\sigma_0 + \sigma})^2 \quad (12)$$

以上公式中的 K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 为被定义的常数项。

4 磁流变弹性体压敏电导的测量

为了获得适当的磁流变弹性体电导,并很好地运用磁能量,利用单自由度测试原理对磁流变弹性体的性能进行测试^[12]。首先将图 2 所示模具的上下端盖通过导线连接成闭合回路,再将连在一起的端盖和磁流变弹性体样品放在压力机的工作台上。压力机的工作台由步进电机控制上下移动,可以调节施加在样品上的压力(如图 4(a)所示)。在保持压力的同时在磁流变弹性体样品两端的端盖上施加直流电压,并测量通过样品的电流(如图 4(b)所示)。

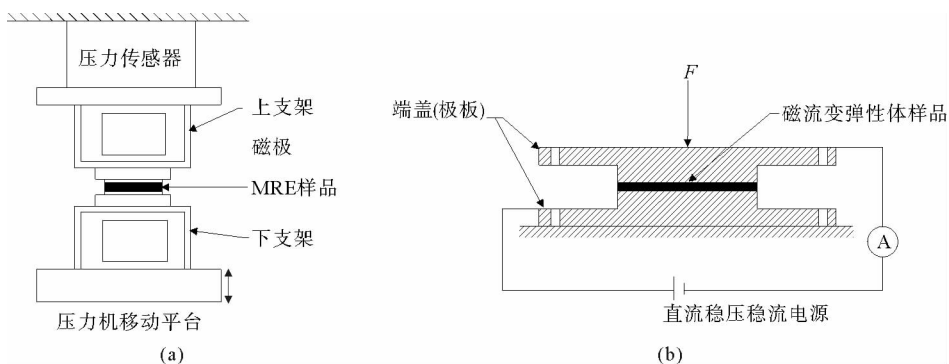


图 4 磁流变弹性体压敏电导测试装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of MREs pressure sensitivity test device

实验测量在一组静态压力下不同电压带来的电流值的变化。根据前述的磁流变弹性体电导的理论分析,对实验结果进行拟合。公式中 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 、 K_5 常数项的拟合结果见表 1。

图 5 表示磁流变弹性体在外加不同压力下电压与电流实测值的关系;在初始电压很小的情况下,流经 MREs 样品的电流几乎一致达到最小值;初始电压从 0 增加到 5 V 过程中,不同压力下流经 MREs 样品的电流随电压变化趋于一致;当电压大于 5 V 时,在相同的电压下,随着外加压力的增加,电流增加的速度越快。

在压力不变时,初始电压从 0 增加到 5 V 过程中,流经 MREs 样品的电流增加速度缓慢,变化趋势基本为线性的。电压大于 5 V 时,电流随着外加电压的增大增加速度变快。电压越大电流增加的越明显,电流与电压表现出明显的非线性关系。这说明磁流变弹性体样品的电导随压力的增加而增加。图中实测值与理论值相符合,说明理论模型能够预测磁流变弹性体的导电特性。

5 结论

通过对磁流变弹性体压敏特性实验研究,定性验证了理论分析的正确性。磁流变弹性体力学性能对磁场的响应与应力变化状态关系对磁流变弹性体的应用具有指导作用,由于磁流变弹性体压敏特性的影响因素包括磁化微粒大小、体积分、单一粒径或者多粒径组合、固化磁场强度以及固化后基体的刚度、外界温度等等,所以对磁流变弹性体导电性能的其他影响因素作进一步的分析研究以得到更广泛的应用。

参考文献:

- [1]POPP K M,KROGER M,LI W H,et al. MRE properties under shear and squeeze modes and applications[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures,2010,21(15):1471-1477.
- [2]LI Y C,LI J C,LI W H,et al. Development and characterization of a magnetorheological elastomer based adaptive seismic isolator[J]. Smart Materials and Structures,2013,22(3):36-46.
- [3]居本祥,余淼,浮洁,等. 磁流变弹性体压缩模式动态力学性能测试[J]. 功能材料,2012,43(3):360-362.
JU Benxiang, YU Miao, FU Jie, et al. Dynamic mechanical properties testing for compression mode of magnetorheological elastomer[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(3): 360-362.
- [4]Jolly M R, Carlson J D, Munoz B C, et al. 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.
- [5]李光辉,黄学功,王灵. 磁流变弹性体阻值特性[J]. 功能高分子学报,2013,26(3):236-240.
LI Guanghui, HUANG Xuegong, WANG Jiong. Resistance characteristics of magnetorheological elastomer[J]. Journal of Functional Polymers, 2013, 26(3): 236-240.
- [6]叶伟强,邓益民,王威. 磁流变弹性体压阻特性实验装置的设计与实验研究 [J]. 传感器与微系统,2011,30(3):43-45.
YE Weiqiang, DENG Yimin, WANG Wei. Design and experimental study of an experimental device for piezoresistivity of magnetorheological elastomers[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(3): 43-45.
- [7]BICA I. Magnetorheological elastomer-based quadrupolar element of electric circuits[J]. Material Science Eng B, 2010, 166(1): 94-98.
- [8]HUANG X, MOHLA A, HONG WEI, et al. Magnetorheological brush: A soft structure with highly tuneable stiffness[J]. Soft Matter, 2014, 10(10): 1537-1543.

表 1 实验结果的常数项拟合值

Tab. 1 The experimental results of constant fitting values

常数项	拟合值	单位
K_1	8.61×10^5	$S \cdot V^{-1} \cdot m^{-2}$
K_2	5.39×10^3	$V \cdot m^{-1}$
K_3	3.33×10^9	$S \cdot m^{-3}$
K_4	1.37×10^{-8}	m
K_5	4.52×10^{-10}	$Pa^{-1/3} m$
σ_0	970	Pa

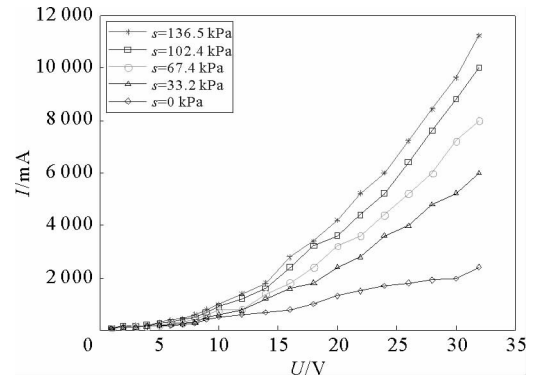


图 5 不同压力下的电压电流关系图

Fig. 5 The relationship between voltage and current under different pressures

- [9]王钰,李斌. 柔性触觉传感器主要技术[J]. 传感器与微系统,2012,31(12):1-4.
WANG Yu,LI Bin. Main technology of flexible tactile sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies,2012,31(12):1-4.
- [10]何慧娟,王雷,许德章. 柔性触觉传感器在机器人上的应用综述[J]. 传感器与微系统,2015,34(11):5-7.
HE Huijuan,WANG Lei,XU Dezhang. Review of applications of flexible tactile sensor in robot[J]. Transducer and Microsystem Technologies,2015,34(11):5-7.
- [11]滕桂荣,朱绪力,孙朝阳,等. 磁流变弹性体的导电机理分析[J]. 功能材料,2015,46(22):45-48.
TENG Guirong,ZHU Xuli,SUN Zhaoyang,et al. Analysis on conductive mechanism of magnetorheological elastomers[J]. Journal of Functional Materials,2015,46(22):45-48.
- [12]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,2013,27(10):36-39.
LI Guanghui,HUANG Xuegong,WANG Jiong. Fabrication and mechanical properties of magnetorheological elastomers[J]. Materials Review,2013,27(10):36-39.

(责任编辑:傅 游)

(上接第 88 页)

- [4]秦志英,董桂西. 偏心激励多刚体振动系统的 Lagrange 方程建模[J]. 机械强度,2007,29(4):544-547.
QIN Zhiying,DONG Guixi. Lagrange modeling of eccentrically excited multi-rigid-body systems[J]. Journal of Mechanical Strength,2007,29(4):544-547.
- [5]付素芳. 滚筒洗衣机的动态特性建模与及结构参数优化研究[D]. 无锡:江南大学,2009.
- [6]郑毅,赵国群,孙胜. 洗衣机振动过程的计算机模拟研究[J]. 振动、测试与诊断,2001,21(3):191-196.
ZHENG Yi,ZHAO Guoqun,SUN Sheng. Computer simulation to the vibration process of a washing machine[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis,2001,21(3):191-196.
- [7]钱静,王志伟. 顶装式波轮洗衣机振动模型及其动态特性分析[J]. 振动与冲击,2001,20(4):77-80.
QIAN Jing,WANG Zhiwei. Modeling and dynamic analysis of washing machine[J]. Journal of Vibration and Shock,2001,20(4):77-80.
- [8]魏玉东,岳立喜,高建,等. 滚筒洗衣机动力学建模及其平衡器设计[J]. 天津大学学报,2008,41(10):1125-1132.
WEI Yudong,YUE Lixi,GAO Jian, et al. Dynamic modeling and balancer design of horizontal-axis washing machine[J]. Journal of Tianjin University,2008,41(10):1125-1132.

(责任编辑:李 磊)