

磁致链化对磁流变弹性体压阻效应的影响

廖干良, 廖昌荣*, 文慧, 谢磊, 燊玉勤

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 为研究磁流变弹性体(Magneto-Rheological Elastomer, MRE)压阻效应机制及其影响因素, 基于场致发射效应机制, 结合均匀型与磁致链化型MRE结构特点, 分别建立了两类镍粉填充液态硅橡胶型MRE的导电模型, 得出了相应的MRE端面电阻表达式, 分析了镍粉质量分数、测试电压对两类MRE阻值的影响; 在零场下制备了均匀型MRE, 在匀强磁场下制备了磁致链化型MRE, 对两类MRE的压阻特性进行了系统测试; 通过分析比较两类MRE的正压力与电阻对数的映射关系, 验证了理论模型的合理性; 相比于均匀型MRE样品的高阻抗和较小的阻值变化范围, 在0~6 kPa压力下, 磁致链化型MRE样品阻值变化区间为 $10\sim10^6 \Omega$, 在触觉传感应用中具有更好的适用性。

关键词: 柔性触觉传感器; 磁流变弹性体; 场致发射; 压阻效应; 磁致链化 Ni 粉; 硅橡胶

中图分类号: TB381 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2017)09-2085-08

Effects of particle pre-orientation via application of magentic field on the piezoresistivity of magnetorheological elastomer

LIAO Ganliang, LIAO Changrong*, WEN Hui, XIE Lei, FAN Yuqin

(Key Laboratory of Optoelectronic Technologies & Systems of Ministry of Education of China,
Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: To investigate the piezoresistivity mechanism and the influence factors of magneto-rheological elastomer (MRE), the conduction models and resistance expressions of isotropic and anisotropic MREs were established respectively based on their structural characteristics and the field emission theory. Further, the effects of Ni filler concentration in silicone rubber and applied voltage on the resistance were analyzed. Experiments were carried out to study the piezoresistive properties of the two MREs. MRE samples with isotropic (prepared without magnetic field) and anisotropic (pre-orientated with a magnetic field) distributions of Ni powders were prepared, respectively. The two conduction models were verified through comparison of the mapping relationships between the experimental pressure and the logarithmic resistance data. In comparison with the high impedance and low resistance range of the isotropic MRE, the anisotropic MRE changes from $10^6 \Omega$ under 0 kPa to 10 Ω under 6 kPa, which presents a better feasibility in tactile sensing applications.

Keywords: flexible tactile sensor; magnetorheological elastomer; field emission; piezoresistivity; pre-orientation Ni powder; silicone rubber

随着机器人智能化程度的进步, 机器人传感器领域迫切需要不同功能的柔性触觉传感材料^[1]。国内外学者在新型柔性传感领域的研究取得了重要的技术进步, 特别是压力敏感型柔性触觉传感器。由于具有良好的柔顺性和耐久性, 导电橡胶具有较好

的发展前景^[2-5]。导电橡胶的导电填充材料主要有炭黑颗粒和金属颗粒^[6], 以炭黑为填料的导电橡胶在柔韧性和导电性方面具有优良的性能^[7]。研究表明炭黑导电橡胶仍存在一定的问题: 炭黑粒子间极性较强导致易团聚; 无法对导电颗粒分布状态进行

收稿日期: 2016-09-27; 录用日期: 2016-11-04; 网络出版时间: 2016-12-07 10:18

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20161207.1018.006.html

基金项目: 国家自然科学基金(51575065); 中央高校基本科研业务费(106112015CDJZR125517)

通讯作者: 廖昌荣, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能结构及系统等 E-mail: crliao@cqu.edu.cn

引用格式: 廖干良, 廖昌荣, 文慧, 等. 磁致链化对磁流变弹性体压阻效应的影响[J]. 复合材料学报, 2017, 34(9): 2085-2092.

LIAO Ganliang, LIAO Changrong, WEN Hui, et al. Effects of particle pre-orientation via application of magentic field on the piezoresistivity of magnetorheological elastomer[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(9): 2085-2092 (in Chinese).

调控；其导电性能易受到服役温度的影响；在辐照环境下导电性能不稳定等^[8-9]。软磁金属颗粒具有优良的导电性，且易于分散，能够更均匀的分布于橡胶基体内部，在固化过程中可用外部磁场调控导电颗粒的分布。磁流变弹性体(Magneto-rheological elastomer, MRE)是一种软磁金属颗粒填充的导电橡胶，在成型过程中施加磁场实现对填充粒子分布进行调控，MRE可作为新型的触觉传感材料^[10]。目前磁流变弹性体更多作为执行元件，由于其内部包含软磁性颗粒，外部磁场能控制软磁颗粒之间的磁相互作用，导致其剪切模量和阻尼损失角变化，从而控制元件的刚度和阻尼特性^[11-12]。磁流变弹性体作为压敏传感元件的研究较少。MRE按内部状态分为均匀型MRE与磁致链化型MRE，两种类型MRE均具有显著的压阻效应。由于填充颗粒的分布状态不同，两种类型的MRE压阻特性有所差异^[13-15]。本文从理论导电模型和实验测试两方面深入研究两类Ni粉/硅橡胶磁流变弹性体的压阻特性，分析质量分数和测试电压对阻值的影响，比较两类MRE在电阻初值、变化范围和测量电流等方面的差异。这些工作对研制新型磁流变弹性体和柔性触觉传感元件具有重要参考价值。

1 MRE 磁致链化机制

由于MRE采用具有高磁导率的镍粉颗粒作为导电填料，镍粉颗粒与液态硅橡胶的混合液可视为高黏度的磁流变液。磁流变液的流变机制如图1所示，无磁场作用时，粒子随机分散在载液中；当有磁场作用时，颗粒由于极化产生了偶极矩，极化粒子在磁场作用下相互吸引，沿磁场方向排成链状结构^[10]。为提高MRE导电性能及其稳定性，在MRE由液态转化为固态过程中，置于匀强磁场中，进行磁致链化处理，使弹性体内部颗粒分布呈链状结构排列。当MRE凝固后，样品内部镍粉颗粒将保持该分布状态不变。磁场的强度越强，极化粒子间相互作用力越

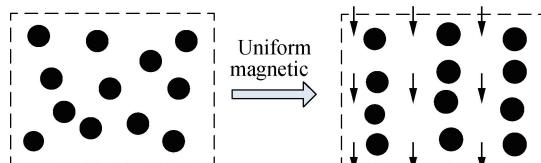


图1 MRE磁致链化机制示意图

Fig. 1 Schematic of MRE particle pre-orientation mechanism

强，其排布形成的链状结构越密集，该链阻值相应的越小。固化后的MRE样品具有导电粒子呈链状排布的微观结构，使样品具有较好的导电性能。

2 MRE 压阻效应机制

MRE属于高分子复合材料，MRE内部相邻粒子间的导电机制可以用场致发射效应来解释，如图2(a)所示。两个粒子间形成的电流密度J可以用Fowler-Nordheim方程表示^[17]：

$$J = \alpha(E_V)^2 \exp\left(-\frac{\beta}{E_V}\right) \quad (1)$$

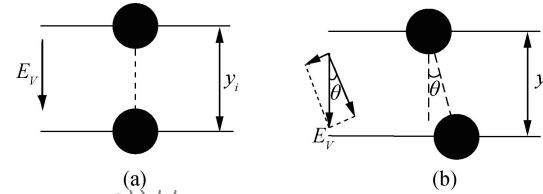


图2 MRE导电单元示意图

Fig. 2 Schematic of electric conduction unit

式中： α 、 β 为常温下与MRE相关电流常数项； E_V 为相邻粒子间的电场。表达式(1)描述了导电粒子沿电场方向呈链状分布下的导电机制。如图2(b)所示，粒子随机分布状态下，相邻居导电粒子形成的导电通道与电场方向存在偏角 θ 。因此，两个导电粒子间形成的电流密度 J 为

$$J = \alpha(E_V \cos\theta)^2 \exp\left(-\frac{\beta}{E_V \cos\theta}\right) \quad (2)$$

样品填充粒径采用粒径均匀的颗粒，导电粒子间导电面积一致，用S表示两粒子间的导电面积，且假设粒子纵向间距的平均值为 y_i ， V_i 为对应的电势差， $V_i = E_V y_i$ ，将式(2)代入颗粒之间电阻表达式 $r = V_i / SJ$ ，相邻粒子间的阻值为

$$r = \frac{y_i^2}{S \alpha V_i \cos\theta} \exp\left(\beta \frac{y_i}{V_i \cos\theta}\right) \quad (3)$$

图3为MRE压阻模型示意图。由图3(a)可知，较高浓度的MRE导电原理可以采用导电网络理论分析，沿电场方向分布的粒子形成粒间电阻，

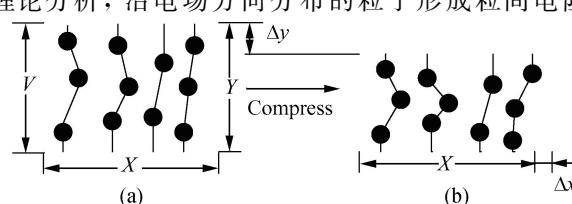


图3 MRE压阻模型示意图

Fig. 3 Schematic of MRE piezoresistivity model

粒间电阻串联形成导电链, 导电链的电阻大小取决于粒间平均电阻 r_i 以及链中粒子个数 $m = D/y_i$, 其中 D 为弹性体样品的厚度; 导电链与导电链之间并联形成导电网络, 假设 N 为弹性体形成导电链的数量; 由于相邻粒子间电场偏角 θ 具有随机性, 且由式(3)可知, 相邻粒子间阻值大小与 θ 值大小成正比, 为便于分析和推导, 将参数 θ 从表达式(3)中分离, 以 $\varphi(\cos\theta)$ 描述电场偏角 θ 对 MRE 阻值的影响。因此, MRE 的体电阻 R 可表示为

$$R = \frac{Dr}{y_i N} = \frac{Dy_i}{NS\alpha V_i} \exp\left(\beta \frac{y_i}{V_i}\right) \frac{1}{\varphi(\cos\theta)} \quad (4)$$

由于粒子分布随机性, 相邻导电粒子与电场平行的概率较小, 函数 $\varphi(\cos\theta)$ 在式(4)中有较大的贡献, 因此, 相邻粒子间电场偏角对阻值存在着显著的影响。如图 1 所示, MRE 经过磁致链化处理后, 内部粒子大部分呈链状排布。粒子分布相对集中, 磁致链化型 MRE 相邻粒子间纵向间隙减小; 且两导电相邻粒子排列方向与电场方向近似平行, θ 趋近 0, $\cos\theta \approx 1$, 因此, 磁致链化型 MRE 的体电阻 R_m 可表示为

$$R_m = \frac{Dr}{y_{im} N} = \frac{Dy_{im}}{NS\alpha V_i} \exp\left(\beta \frac{y_{im}}{V_i}\right) \quad (5)$$

均匀型 MRE 内部相邻粒子间存在电场偏角, 由于粒子阻值的累积作用, 将导致 $\varphi(\cos\theta) < 1$ 。故在相同条件下, $R_m \ll R$, 其中, R 表示均匀型 MRE 阻值。

由式(4)和式(5)可知, 在导电通道网络中, 相邻粒子间的阻值与粒子间距、电势差倒数呈指数关系。因此, 弹性体的阻值受导电通道网络中的粒子平均间隙以及测试电压的影响。

由图 3(a)~3(b)可知, 当 MRE 受到纵向垂直压力时, 弹性体产生形变, 纵向、横向均产生位移, 弹性体泊松比 μ 介于 0.49~0.5 之间, 在压缩过程中, 体积变化可忽略不计。因此, MRE 压阻效应主要由于样品受力形变导致弹性体内部导电粒子分布发生变化导致电阻率变化。假设弹性体的横向应变为 ϵ_x , 纵向应变为 ϵ_y , 其变化规律满足广义胡克定律。由于 MRE 已固化成型, 导电粒子在橡胶内嵌于橡胶内部, 其相对位置变化规律也近似的满足广义胡克定律。

假设 x_i 为相邻粒子间初始横向距离, Δx_i 为横向位移变化分量, Δy_i 为相邻粒子间纵向距离变化分量。由于横向位移 Δx_i 与施加电场正交:

$$\Delta x_i \times E_V = 0 \quad (6)$$

因此, 横向形变对弹性体阻值的 MRE 阻值变化没有贡献, 忽略其影响。MRE 受力形变后, 相邻粒子间平均间隙变为 $y_i = y_0(1 - \epsilon_y)$; 对于均匀型 MRE, 变形后相邻粒子间电场偏角 θ 的余弦函数也将变化, 其变化关系为

$$\frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_0} = \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \frac{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}{y_0} \approx (1 - \epsilon_y) \quad (7)$$

将 $y_i = y_0(1 - \epsilon_y)$ 及上式代入式(4), 则相邻粒子间阻值与形变量之间的关系式为

$$R = R_0(1 - \epsilon_y)^2 \exp\left(-\beta \frac{y_i \epsilon_y}{V_i}\right) \quad (8)$$

被测样品电机接触面积为 A , 将 $\epsilon_y = F/AE$ 代入式(8)可得到均匀型 MRE 的体电阻 R 与 F 的对应关系:

$$R(F) = R_0 \left[1 - \frac{F}{AE}\right]^2 \exp\left(-\beta \frac{y_i F}{V_i AE}\right) \quad (9)$$

相对于均匀型 MRE, 磁致链化型 MRE 样品的电场偏角影响函数 $\varphi(\cos\theta) \approx 1$, 其影响可以忽略, 相应的, 其体电阻 R_m 与 F 的对应关系就可以表示为

$$R_m(F) = R_0 \left[1 - \frac{F}{AE}\right]^2 \exp\left(-\beta \frac{y_{im} F}{V_i AE}\right) \quad (10)$$

均匀型 MRE 与磁致链化型 MRE 的体电阻 R 对压力 F 的响应模型在形式上相似, 因此将式(9)和式(10)用统一的模型进行表达, 可得 MRE 体电阻 R 与压力 F 之间的压阻模型通用关系式为

$$R(F) = R_0(1 - pF)^k \exp(-qF) \quad (11)$$

当 MRE 为均匀型, $k=3$; 当 MRE 为磁致链化型, $k=2$ 。由上述推导过程可知, 在不同的质量分数和不同电压下, 初始阻值和电阻变化率将存在明显的差异。因此, 式(11)中系数 p 和 q 为与颗粒填充浓度 ω 和施加电压 V 相关的参数。

在上述理论分析与推导过程中, 由于 $\varphi(\cos\theta)$ 在均匀型 MRE 导电模型中具有非常显著的影响, 因此, 磁致链化型 MRE 和均匀型 MRE 在导电性能方面将具有显著的差异。

3 实验材料及方法

实验橡胶基体采用深圳红叶杰科技有限公司生产的 RTV-2 型室温硫化硅橡胶和对应的凝固剂, 以及二甲基硅油(工业品), 导电填料用重庆洛德冶金粉末厂生产的 2.5 μm 粒径碳基镍粉, 碳基镍粉表面处理剂采用硅烷偶联剂 KH550(工业品)。

图 4 为均匀型 MRE 和磁致链化型 MRE 制备过程, 将硅橡胶和作为润滑剂的硅油充分混合并搅

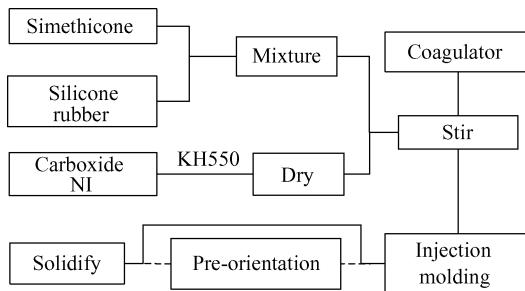


图 4 MRE 制备流程

Fig. 4 Flow chart of MRE preparation

拌均匀；为增强镍粉在橡胶基体中的相容性，提高复合材料的力学性能，使用硅烷偶联剂 KH550 对羰基镍粉进行表面预处理^[18]，并在 120℃ 恒温箱中干燥 2 小时，将上述两份材料混合，采用机械搅拌 20 分钟后，按照硅橡胶质量的 2% 的比例往其中加入凝固剂，再次进行 10 分钟的机械搅拌，之后将材料注入模具。其中，均匀型 MRE 直接常温固化成型，而磁致链化型 MRE 则注入模具之后置于匀强磁场中常温固化成型。样品尺寸均为 $\Phi 30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。

为便于控制磁场大小，研究不同磁场强度对磁流变弹性体导电性能的改善作用，实验采用直流电源激励线圈产生匀强磁场，实验装置如图 6 所示，该实验装置所产生的匀强磁场强度采用特斯拉计进行标定。

由于在低浓度下，样品电阻基本处于绝缘状态，压阻效果并不明显，根据经验，本实验分别配

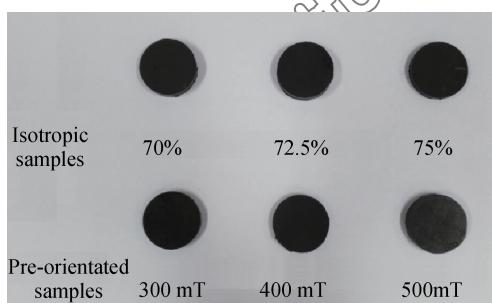


图 5 均匀型 MRE 和磁致链化型 MRE 样品实物图

Fig. 5 Real products of MRE samples

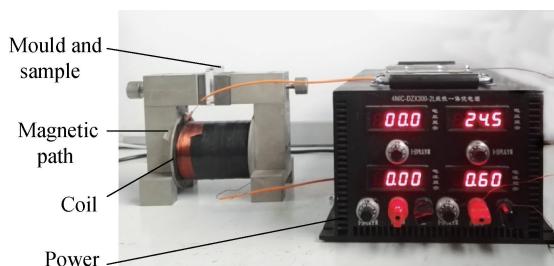


图 6 MRE 磁致链化装置

Fig. 6 MRE pre-orientation device

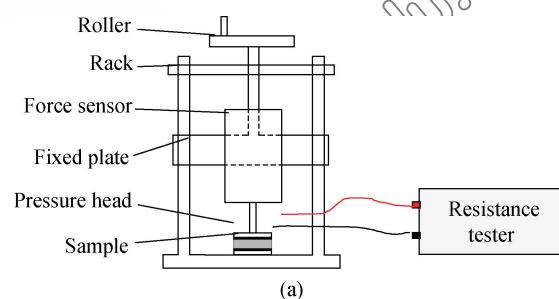
置了质量分数为 70%、72.5%、75% 的三种样品，用于制备均匀型 MRE，三种样品具体配比如表 1 所示。实验制备了三份颗粒填充质量分数为 70% 的样品，固化时分别在 300 mT、400 mT、500 mT 匀强磁场下进行磁致链化处理，如图 5 所示。

表 1 Ni 粉/硅橡胶磁流变弹性体配方比例

Tabel 1 Proportion of Ni powder/silicone rubber

magnetorheological elastomer			wt%
Carboxide Ni	Simethicone+Silicone rubber	Coagulator	
70	29.40	0.6	
72.5	26.95	0.55	
75	24.50	0.5	

实验测试系统由螺旋推拉力试验机（乐清市艾德堡仪器有限公司，型号：NK-500）和绝缘电阻测试仪（江苏常州市优策电子科技有限公司，型号：UC2684-A）构成。螺旋推拉力试验机包括精度为 0.002 mm 数显式螺旋测微仪，精度为 0.1 N、量程为 0~500 N 的 HP-500 型力传感器，以及实验所需的压头、夹具。绝缘电阻测试仪可实时测量样品的电阻，测试电阻范围为 1~50 TΩ，测量精度 $\geq 2\%$ ，输出电压范围为 0~1 000 V。实验原理及实物图如图 7(a) 和 7(b) 所示。



(a)



(b)

图 7 测试系统结构及实物图

Fig. 7 Structure and practicality of test system

4 实验结果

4.1 均匀型 MRE 压阻特性实验结果

为确保实验测试准确性，在样品具有一定的预紧力下开始记录数据，并且在阻值保持稳定之后再

读取数据。

图 8 为不同质量分数 Ni/硅橡胶样品的压力-应变关系。可知, 样品的压力应变基本保持线性关系, 样品仍处于弹性变形阶段, 由于初始接触问题, 曲线开始点存在一定的误差。由于样品填充比例较为接近, 因此三类填充样品的压力-应变曲线斜率较为接近。压力和电阻的关系与形变和电阻的关系具有的等效关系, 文中主要从压阻方面进行了推导与验证。

图 9(a)为在 50 V 电压下, Ni 粉质量分数为 70%、72.5%、75% 的三种弹性体压阻特性。图 9(b)为 Ni 粉质量分数 72.5% 的弹性体在 20 V、50 V、100 V、200 V 电压下的压阻特性。

由图 9(a)可知, Ni 粉质量分数为 70%、72.5%、75% 的三种弹性体均表现出了压阻特性, 浓度越高, 弹性体的压阻特性越明显, 其中, 75% 质量分数弹性体在 0~300 N 压力作用下, 电阻由 $10^{12} \Omega$ 以指数趋势下降至 $10^4 \Omega$, 72.5% 质量分数弹性体在 0~400 N 压力作用下, 电阻由 $10^{12} \Omega$ 以指数趋势下降至 $10^5 \Omega$, 而 70% 质量分数弹性体变化趋势则稍微缓慢, 在低于 14 kPa 压力下, 变化趋势仍不明显, 电阻仅下降了一个数量级, 仅当压力为 14~24 kPa 时, 电阻下降了数个数量级, 由 $10^{11} \Omega$ 以指数趋势下降至 $10^8 \Omega$ 。

在弹性体中, 微观中的平均粒子间隙由弹性体的质量分数所决定, 若弹性体的填充质量分数为 ω , 假设弹性体内部填充颗粒均匀分布, 采用正方体模型来计算相邻粒子间隙, 则弹性体的微观平均粒子间隙 y_i 与填充质量分数 ω 的关系式可以表

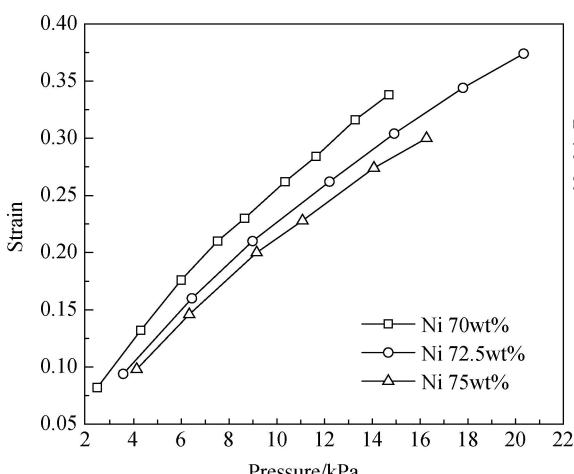


图 8 Ni 粉/硅橡胶 MRE 样品压力-应变曲线

Fig. 8 Pressure-strain curves of Ni powder/silicone rubber MRE samples

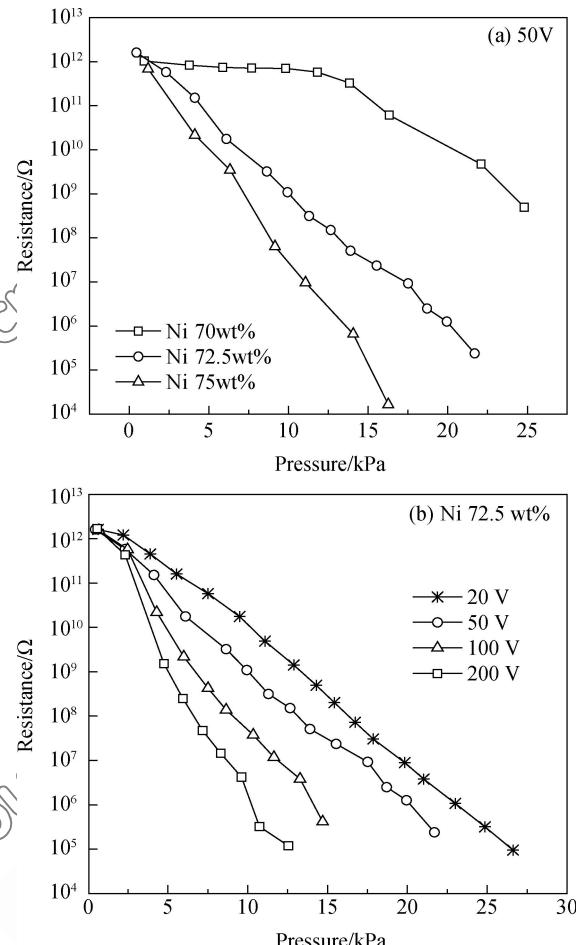


图 9 均匀型 Ni 粉/硅橡胶 MRE 压阻特性曲线

Fig. 9 Piezoresistive curves of isotropic Ni powder/silicone rubber MRE

示为

$$y_i = \sqrt[3]{\frac{m}{\rho_1} \left[\frac{d}{\rho_1} + \left(\frac{1}{\omega} - 1 \right) \frac{1}{\rho_2} \right]} \quad (13)$$

式中: m 为填充颗粒质量; ρ_1 、 ρ_2 分别为填充颗粒密度和基体的密度, 将上式代入式(6), 对 R 求关于 ω 的偏导数, 可得

$$\frac{\partial R}{\partial \omega} = \frac{\partial R}{\partial y_i} \frac{\partial y_i}{\partial \omega} = - \left[\frac{1}{y_i} + \frac{\beta}{V_i} \right] R \frac{1}{3y_i^2 \rho_2 \omega^2} \quad (14)$$

上式显示偏导数恒为负数。因此, 弹性体阻值随着填充颗粒浓度的增加而减小, 这也符合一般导电橡胶的实际特性, 即填充颗粒质量分数越高的弹性体, 其导电性能越好。

为了验证上述理论推导所得模型的正确性, 对实验数据进行拟合, 通过分析模型与实验数据的吻合度来验证模型的合理性。在上述理论推导中, 式(11)描述了弹性体阻值 R 与压力 F 之间的关系, 因此, 利用式(11)与实验数据进行拟合。为便于计

算机拟合, 对式(11)等号两边取对数, 可得

$$\log[R(F)] = \log(R_0) + k \log(1 - pF) - qF \quad (15)$$

将式(13)中对数部分 $\log(1 - pF)$ 按泰勒级数展开, 取前两项并带入原式中:

$$\log[R(F)] = \log(R_0) + aF - bF^2 \quad (16)$$

如图 9(a)所示, Ni 粉质量分数为 70% 的弹性体压阻特性并不理想, 是由于填充颗粒浓度较低时, 弹性体内部平均间隙较大, 根据式(5)可得, 弹性体阻值与 MRE 内部颗粒之间平均间隙成正比, 因此, 较低质量分数弹性体表现出比较大的电阻率, 仅当压力导致足够的形变之后才表现出压阻效应。而 Ni 粉质量分数为 72.5% 和 75% 的弹性体具有较为显著的压阻效应, 因此, 用 Ni 粉质量分数 72.5% 和 75% 的弹性体在 50 V 下的测试实验数据进行拟合, 其结果如图 10 所示, 实验结果与模型拟合曲线具有较高的吻合度, 验证了上述理论推导所得模型的正确性。

弹性体阻值与 MRE 内部颗粒之间平均间隙成正比, 因此, 在测试电压对阻值的影响实验中, 由于初始阶段电阻较大, 测量仪器精度有限, 导致测量的 MRE 初始阻值差异性不大。随着压力的增大, 不同电压条件下, 弹性体电阻的变化表现出不一致的情况。由图 9(b)可知, 根据不同测试的压阻特性实验结果, 在相同压力下, 测试电压越大, 所测的弹性体的阻值越小。该现象验证了理论推导的正确性, 即弹性体电阻率与电压的倒数呈正比。因此, 弹性体受力形变导致电阻变化的过程中, 电压也是较为关键的参数。采用式(16)对不同电压下的压阻特性实验结果进行了拟合, 拟合结果如表 2 所示, 均有较好的吻合度。

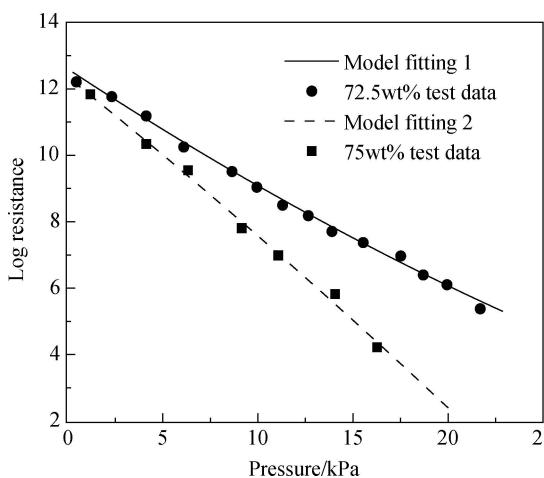


图 10 不同 Ni 粉质量分数均匀型 MRE 压阻特性拟合曲线

Fig. 10 Fitting results of isotropic MRE piezoresistive curves of Ni powder different mass fractions

表 2 不同电压下均匀型 MRE 压阻特性曲线拟合结果

Table 2 Fitting result of isotropic MRE piezoresistive curves under different voltages

Test voltage/V	Parameter <i>a</i>	Parameter <i>b</i>	R-square
20	0.0295	1.623e-05	0.9973
50	0.04095	1.118e-05	0.9948
100	0.05841	5.841e-05	0.9823
200	0.07909	9.239e-05	0.9762

上述实验数据表明, 各向同性弹性体初始阻值均比较大, 达到 $10^{12} \Omega$, 在压力变形过程中, 弹性体阻值变化范围为 $10^{12} \sim 10^4 \Omega$, 在实际应用过程中, 对测量电路要求较高, 要求电流检测精度达到 $10^{-12} A$, 造成电路成本较高, 电路设计较复杂; 且检测精度和测量电路的响应频率两者无法兼顾, 造成传感器测量电路成本高、响应慢、不利于小型化等缺点。因此, 需要对该材料进行磁致链化处理, 可降低初始阻值、减小阻值变化范围, 以降低测量电路成本和规模, 提高传感材料的可靠性。

4.2 磁致链化型 MRE 压阻特性实验结果

在与均匀型 MRE 相同条件下测试了磁致链化型 MRE 样品的压阻特性, 测试结果见图 11 中的测试数据部分, 在不同强度磁场下预结构化的样品, 其初始阻值具有显著的不同, 其中, 500 mT 匀强磁场下固化的初始阻值最小, 其数量级为 $10^6 \Omega$, 300 mT 磁场下固化样品初始阻值为 $10^8 \Omega$ 。三种样品均具有显著的压阻效应, 其阻值随压力指数下降。经过磁致链化处理后, MRE 样品内部粒子结构分布规律发生改变, 由随机无序分布状态转变为链状分布结构, 相比于无序分布状态, 该状态下, 弹性体内部更易形成导电链, 且由于粒子排列有序, 相邻粒子间初始间隙更小, 导致磁流变弹性体初始阻值较小。因此, 经过预结构化的磁流变弹性体阻值将得到非常显著的降低。

如前面理论推导, 磁致链化型 MRE 的压阻模型与均匀型 MRE 的压阻模型形式基本一致, 采用式(14)对实验结果进行拟合, 拟合结果如图 11 所示, 其中, 实验数据为点状数据, 线条为模型拟合曲线, 拟合曲线与实验数据之间具有较好的重合度。

4.3 磁致链化对 MRE 的压阻特性的影响

表 3 对均匀型 MRE 与磁致链化型 MRE 的压阻特性实验结果进行了比较。经过磁致链化之后的 MRE 初始阻值显著降低。采用压阻效应较为显著的 Ni 粉质量分数为 72.5% 的均匀型 MRE 与经过磁致

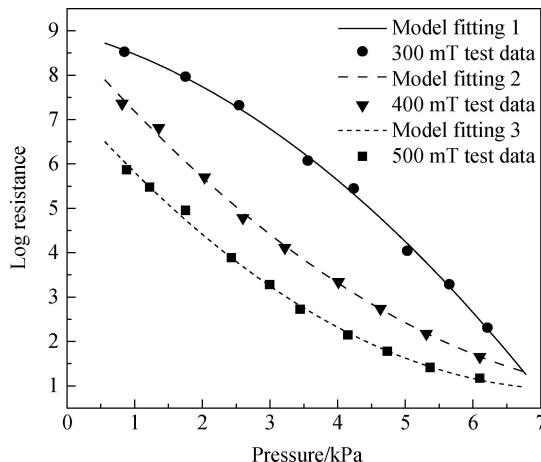


图 11 不同磁场磁致链化型 MRE 压阻特性曲线

Fig. 11 Piezoresistive curves of pre-oriented MRE under different magnetic fields

链化 Ni 粉质量分数为 70% 的 MRE 进行对比。对比 300 mT、400 mT、500 mT 的实验结果, 其中, 质量分数为 70% 的磁流变弹性体经过 500 mT 的匀强

磁场磁致链化, 初始阻值减小量最为显著, 由 $10^{12} \Omega$ 降低到了 $10^6 \Omega$ 。在 0~6 kPa 压力下, 磁流变弹性体的阻值变化范围 $10^{12} \sim 10^4 \Omega$ 减小至 $10^6 \sim 10 \Omega$ 。分析了不同的 MRE 样品压阻特性在传感器测量电路中电压和电流响应。以测量电压 10 V 为例, 在 0~6 kPa 压力下, 根据电阻变化范围, 计算相应需要测试的电流数量级。500 mT 磁致链化型 MRE 样品在 10 V 电压下, 相比于均匀型 MRE 样品, 所需测量电流由 $10^{-11} \sim 10^{-9} \text{ A}$ 转变为 $10^{-5} \sim 1 \text{ A}$, 具有较为便于测量与应用的电阻和电流变化范围。传感器检测的电流越微弱, 对电路精度要求越高。这将造成电路复杂度和成本的增加, 并且降低系统的响应时间。因此, 磁致链化型 MRE 在传感器检测电路中优势明显。磁致链化型 MRE 具有更高的实用价值, 其低阻抗的压阻特性给检测电路带来了便利, 降低电路成本。更适应于传感器的实际应用。

表 3 不同 MRE 样品 10 V 测试电压下电阻与电流响应(压力: 0~6 kPa)

Table 3 Resistance and current response of different MREs under 10 V test voltage (Pressure: 0~6 kPa)

Ni mass fraction/wt%	Magnetic intensity/mT	Initial resistance/ Ω	Strain range	Resistance range/ Ω	Current range/A
72.5	0	10^{12}	0~0.150	$10^{12} \sim 10^{10}$	$10^{-11} \sim 10^{-9}$
70.0	300	10^8	0~0.168	$10^8 \sim 10^2$	$10^{-7} \sim 10^{-1}$
70.0	400	10^6	0~0.168	$10^7 \sim 10$	$10^{-6} \sim 1$
70.0	500	10^6	0~0.168	$10^6 \sim 10$	$10^{-5} \sim 1$

5 结 论

(1) 推导的磁流变弹性体(Magneto-Rheological Elastomer, MRE)阻值模型能够很好地描述浓度和测试电压对 MRE 电阻值的影响, MRE 压阻模型 $R(F) = R_0(1-pF)^k \exp(-qF)$ 能够很好地描述磁流变弹性体阻值与压力的对应关系, 通过了实验的验证, 具有较好的实用性。

(2) 分析了均匀型 Ni 粉/硅橡胶 MRE 与磁致链化型 MRE 的内部导电粒子分布状态差异, 并将该差异因素带入模型推导中, 得出磁致链化处理使 MRE 阻值显著下降的结论, 实验结果很好的验证了这一结论。

(3) 作为一种可用于触觉传感材料, 从传感器系统检测电路角度方面分析比较了 Ni 粉/硅橡胶均匀型 MRE 与磁致链化型 MRE 的导电性能差异, 具有较低电阻率的磁致链化型 Ni 粉/硅橡胶 MRE 能够更好地作为一种柔性触觉传感材料, 能够有效降低电路设计难度和传感器成本。

参 考 文 献:

- [1] 刘少强, 黄惟一, 王爱民, 等. 机器人触觉传感技术研发的历史现状与趋势[J]. 机器人, 2002, 24(4): 362-366.
LIU S Q, HUANG W Y, WANG A M, et al. Overview and prospect of research and development on robot tactile sensory technology[J]. ROBOT, 2002, 24(4): 362-366 (in Chinese).
- [2] MAMUNYA Y P, MUZYCHENKO Y V, PISSIS P, et al. Processing, structure, and electrical properties of metal-filled polymers[J]. Journal of Macromolecular Science Part B, 2001, 40(3-4): 591-602.
- [3] HU Y J, ZHANG H Y, LI F, et al. Investigation into electrical conductivity and electromagnetic interference shielding effectiveness of silicone rubber filled with Ag-coated cenosphere particles[J]. Polymer Testing, 2010, 29(5): 609-612.
- [4] WANG L, DING T, WANG P. Thin flexible pressure sensor array based on carbon black/silicone rubber nanocomposite [J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(9): 1130-1135.
- [5] WANG L, DING T, WANG P, et al. Research on stress and electrical resistance of skin-sensing silicone rubber/carbon

- black nanocomposite during decompressive stress relaxation [J]. *Smart Materials & Structures*, 2009, 18(6): 5022-5039.
- [6] 游长江. 功能橡胶制品[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 71-95.
- YOU C J. Features rubber products[M]. Beijing: Chemical Industry Alternative Translations, 2013: 71-95 (in Chinese).
- [7] 刘平, 黄英, 刘秀梅, 等. 基于炭黑填充导电橡胶的力敏传感器的灵敏度[J]. 复合材料学报, 2012, 29(1): 16-20.
- LIU P, HUANG Y, LIU X M, et al. Mechanical sensitivity of pressure-sensitive sensor based on conductive rubber filled by carbon black[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012, 29(1): 16-20 (in Chinese).
- [8] ZHANG J, FENG S. Temperature effects of electrical resistivity of conductive silicone rubber filled with carbon blacks [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003, 90(14): 3889-3895.
- [9] ZHANG X W, PAN Y, ZHENG Q, et al. Time dependence of piezoresistance for the conductor-filled polymer composites [J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2000, 38(21): 2739-2749.
- [10] 许阳光, 龚兴龙, 万强, 等. 磁敏智能软材料及磁流变机理[J]. 力学进展, 2015, 45(1): 461-495.
- XU Y G, GONG X L, WAN Q, et al. Magneto-sensitive smart soft material and magnetorheological mechanism[J]. *Advances in Mechanics*, 2015, 45(1): 461-495 (in Chinese).
- [11] 汪建晓, 孟光. 磁流变弹性体研究进展[J]. 功能材料, 2006, 37(5): 706-709.
- WANG J X, MENG G. Research advances in magnetorheological elastomers[J]. *Functional Materials*, 2006, 37(5): 706-709 (in Chinese).
- [12] LI W, ZHANG X. Research and applications of MR elastomers[J]. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2010, 1(3): 161-166.
- [13] KCHIT N, BOSSIS G. Piezoresistivity of magnetorheological elastomers[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2008, 20(20): 204136.
- [14] LANOTTE L, AUSANIO G, IANNOTTI V, et al. Influence of particle pre-orientation on elastomagnetic effect in a composite material of ellipsoidal Ni microparticles in a silicone matrix[J]. *Applied Physics A*, 2003, 77(7): 953-958.
- [15] 李光辉, 黄学功, 王昊. 磁流变弹性体的阻值特性[J]. 功能高分子学报, 2013, 26(3): 236-240.
- LI G H, HUANG X G, WANG J. Resistance characteristics of Magnetorheological elastomer[J]. *Journal of Functional Polymers*, 2013, 26(3): 236-240 (in Chinese).
- [16] 邓益民, 叶伟强, 王威. 基于磁流变弹性体导电机理的压阻特性理论模型研究[J]. 机械制造, 2011, 49(5): 26-29.
- DENG Yimin, YE Weiqiang, WangWei. Research on Theoretical models of piezoresistivity of magnetorheological elastomer based on its electric conduction mechanism[J]. *Machinery*, 2011, 49(5): 26-29 (in Chinese).
- [17] STASSI S. Tactile sensor devices exploiting the tunnelling conduction in piezoresistive composites[D]. Turin: Polytechnic University of Turin, 2013: 50-68.
- [18] 李秀错, 张建永, 苏恺, 等. 添加剂对铁/聚丙烯酸锂复合微粒-硅油电流变和磁流变效应的影响[J]. 复合材料学报, 2000, 17(4): 119-123.
- LI X C, ZHANG J Y, SU K, et al. Influences of the additive on electro-and magneto-rheological effects of γ -Fe₂O₃/polyacrylate composite particles in silicone oil [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2000, 17(4): 119-123 (in Chinese).