

基于炭黑填充导电橡胶的压力传感器非线性特性

刘平^{1,2}, 黄英^{2,3}, 廉超³, 蒋红生³, 刘秀梅³, 赵小文³

(1. 中国科学技术大学自动化系, 安徽 合肥 230027; 2. 中国科学院合肥智能机械研究所, 安徽 合肥 230031;
3. 合肥工业大学电子科学与应用物理学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:通过分析力敏炭黑填充导电橡胶(力敏导电炭黑/橡胶)“负电阻-压力系数”(NPCR)的主因,研究了基于炭黑填充导电橡胶的力传感器非线性特性。研究表明,当炭黑体积分数接近临界渗流体积分数时,NPCR 非线性的主因为电阻率的非线性减小;炭黑体积分数在渗流区时,NPCR 非线性的主因为电阻率的非线性减小和导电橡胶应力-应变关系的非线性;若炭黑体积分数在传导区时,NPCR 非线性的主因为应力-应变关系的非线性。随着炭黑体积分数的增大,力敏导电炭黑/橡胶的 NPCR 非线性逐渐减弱。此外,由于界面压阻效应以及导电橡胶近似不可压缩体的性质,用于获取 NPCR 效应的电极分布形式也对 NPCR 效应的非线性特性存在影响。

关键词:非线性; 炭黑; 导电橡胶; 触觉传感器

中图分类号: TP212 文献标识码: A 文章编号: 1000-7555(2012)08-0072-04

当力敏导电炭黑/橡胶用于制作柔性触觉传感器时,需了解其输入-输出特性的非线性主要原因,以便于后续的非线性校正。力敏导电炭黑/橡胶存在非线性的主要原因有:导电特性的非线性;作为传感机理的 NPCR 的非线性。目前研究主要针对其导电特性的非线性,以及从实验角度研究填料种类的选取与并用对力敏导电炭黑/橡胶 NPCR 非线性的影响^[1~4]。文献[4]指出,导电特性的非线性主要是因为电阻自发发热行为,以及材料内部的导电渗流网络在电场作用下的微小变化。关于 NPCR 效应非线性的分析未见报道,本文研究了力敏导电炭黑/橡胶 NPCR 效应的非线性,为进一步提高此种传感器的性能提供理论参考。

1 实验部分

1.1 原料与制备

样品原料、制备及其参数获取方法见文献[5],参数见 Tab. 1,样品半径与厚度约为 8.75mm、2mm。

1.2 测试分析

用济南鑫光 LDW-02A 型数显式电子拉力试验机测量样品的弹性模量、应力-应变关系。

Tab. 1 Parameters of the Carbon Black/ Rubber Composite

Sample	<i>m</i> (g)	Φ_0 (%)	Φ_c (%)	<i>t</i>	ν	<i>E</i> (MPa)
S1	1.5	26	25.5	2.4	0.49	1.23
S2	1.5	28	25.5	2.4	0.49	1.45
S3	1.5	30	25.5	2.4	0.493	1.66

* *m* is the mass of rubber; Φ_0 is the volume fraction of carbon black; Φ_c is the critical volume fraction of the carbon black/rubber composite. *t* is the seepage coefficient. ν is the Poisson's ratio. *E* is the elastic module

2 结果与讨论

2.1 力敏导电炭黑/橡胶的 NPCR 效应计算模型

根据导体的电阻计算公式,设初始电阻 $R_0 = \rho L/S$,式中: ρ ——电阻率; L ——厚度; S ——截面积。若受压后仅材料的厚度发生改变,则电阻变化 ΔR 为:

$$\Delta R = \rho n / S \quad (1)$$

式中: n ——厚度压缩量。若材料满足胡克定律:

$$F = kn \quad (2)$$

式中: F ——压力; k ——弹性系数。将式(2)代入式(1),结合 k 与弹性模量 E 的关系($kL = ES$),得 ΔR 为:

$$\Delta R = \rho F / kS = \rho L F / ES^2 = R_0 F / ES = R_0 \rho / E \quad (3)$$

式中: p —— 压强。理想条件下的 NPCR 的计算模型为:

$$R/R_0 = (R_0 - \Delta R)/R_0 = 1 - \Delta R/R_0 = 1 - (p/E) \quad (4)$$

式(4)表明理想条件下的 NPCR 效应呈线性特性。采用通用有效介质理论(GEM)得出的导电炭黑/橡胶 NPCR 的计算模型为^[5,6]:

$$\frac{R}{R_0} = \frac{\rho_k}{\rho_0 k_0} = (\varphi_0 - \varphi_c)^t \left[\varphi_0 \exp\left(\frac{1-2V}{E} p\right) - \varphi_c \right]^{-1} \times \exp\left[-\frac{1+2V}{E} p\right] \quad (5)$$

Fig. 1 为理想情形和 GEM 模型下的 NPCR 理论曲线与实验数据的比较。实验数据与理想情形下的理

论模型存在较大差距, 而与 GEM 模型吻合较好, 表现出一致的 NPCR 特性。NPCR 效应呈现较强的非线性。

2.2 力敏导电炭黑/橡胶 NPCR 非线性的主要原因

在外加压力场下, 材料的电阻率和形状同时变化, 通过实验无法单独分析电阻率的变化和应力-应变关系对 NPCR 非线性的影响程度。由于 NPCR 效应以及 NPCR 效应非线性特性均是电阻率的变化和应力-应变关系复合作用的结果, 从而可以认为, NPCR 效应的主因即 NPCR 非线性特性的主因。

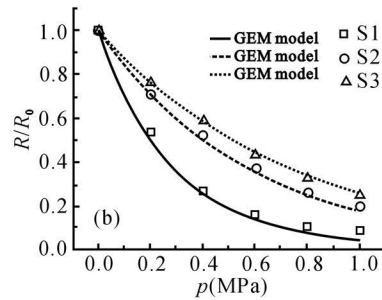
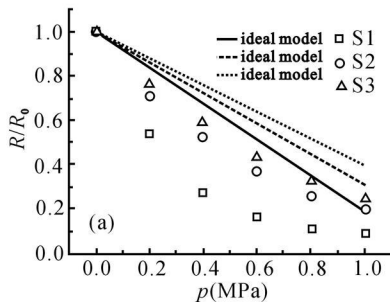


Fig. 1 NPCR of the Carbon Black/Rubber Resulted from Experimental Data and Model

(a) ideal model; (b) GEM model

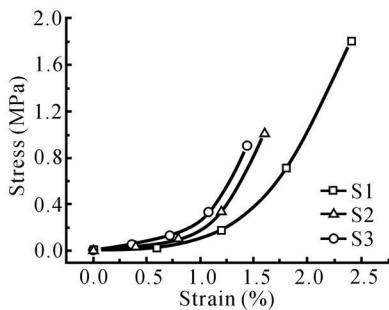


Fig. 2 Stress-Strain Law of the Carbon Black/Rubber

文献[5]指出, 力敏导电炭黑/橡胶 NPCR 效应的主要原因: 若炭黑体积分数接近临界渗流体积时, 以压阻效应为主; 若在渗流区时, 当压力较小, 以压阻效应为主因, 当压力较大, 以应变效应为主因; 若在传导区, 以应变效应为主因。从而, NPCR 非线性的主因为: 当炭黑体积分数接近临界渗流体积, NPCR 非线性的主因为电阻率的非线性减小; 若炭黑体积分数在渗流区, 主因为电阻率的非线性减小和导电橡胶应力-应变关系的非线性变化; 当炭黑体积分数在传导区, 主因为应力-应变关系的非线性。

外加压力场对炭黑体积分数接近临界渗流体积和渗流区的材料影响较大; 对在传导区的材料影响较小。

表明压阻效应的非线性随着炭黑体积分数的增大而减弱。Fig. 2 为样品的应力-应变实验结果, 应力-应变的非线性也随着炭黑体积分数的增大而减弱。从而表明 NPCR 的非线性特性随着炭黑体积分数的增大而逐渐减弱, 分析 Fig. 1 可知理论分析与实验结果一致。

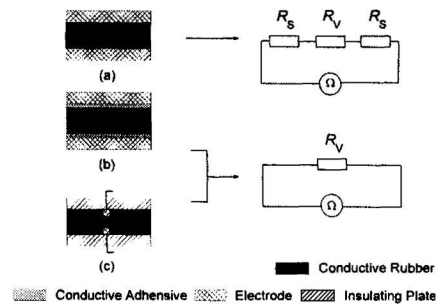


Fig. 3 Types of Electrode

(a): Type I: double sided contacting of the carbon black/rubber; (b): Type II: double sided contacting of the carbon black/rubber with conductive adhesive; (c): Type III: inserted electrode in the carbon black/rubber

2.3 界面压阻效应和导电橡胶近似不可压缩体性质对力敏导电炭黑/橡胶 NPCR 效应非线性的影响

由于界面压阻效应以及力敏导电炭黑/橡胶近似不可压缩体的性质, 用于获取 NPCR 效应的电极分布

形式会对 NPCR 效应的非线性特性存在影响。应用力敏导电炭黑/橡胶制作触觉传感器时,国内外学者主要使用如 Fig. 3 的电极样式提取 NPCR 效应^[7]。图中 R_v 为材料体电阻, R_s 为界面电阻。Fig. 3(a) 中将电极直接贴于材料表面。Fig. 3(b) 在电极与力敏导电炭黑/橡胶之间涂有导电胶,用于去除界面电阻。Fig. 3(c) 将电极内嵌于力敏导电炭黑/橡胶内进行 NPCR 效应的提取,电极与材料的接触面积小,无界面压阻效应。

假设两个材料的厚度和电阻率相同,仅截面积不同,若使用电极类型 II 获取体电阻,根据欧姆定律,材料电阻之比与其截面积成反比。若使用电极类型 III 进行体电阻的获取,由于电极面积较小,需把材料的体电阻看成很多分立电阻的并联,如 Fig. 4。根据并联电阻的计算方法,仅截面积不同的材料其总电阻的倒

数之差为 $2/R_{i+1}$ 。 R_{i+1} 处于边缘,阻值较大,故 $2/R_{i+1} \approx 0$,说明截面积微小的增大对电极类型 III 获取的体电阻值影响较小。故比较类型 II 和类型 III 获取的 NPCR 实验数据可以研究导电橡胶的类不可压缩性对 NPCR 效应非线性行为的影响。由于去除了界面电阻,比较电极类型 I 和类型 II 获取的 NPCR 实验数据可以研究界面压阻效应对 NPCR 效应非线性行为的影响。

采用 Fig. 3 中不同的电极类型获取的 NPCR 实验数据如 Fig. 5,线性拟合得相关系数(C)如 Tab. 2。分析 Tab. 2,对于同一样品,电极类型 I、II、III 获取的压阻实验数据的线性拟合优度依次递增。从而得出,界面电阻的存在和近似不可压缩体的性质会加剧力敏导电炭黑/橡胶 NPCR 效应的非线性。

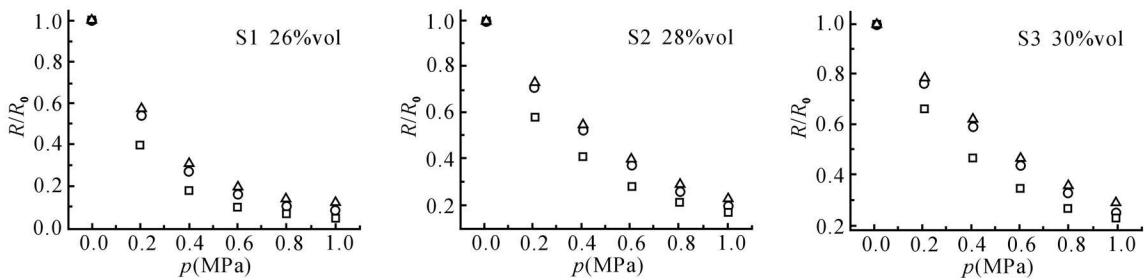


Fig. 5 Experimental Data Acquired by Different Types of Electrode

□: Type I; ○: Type II; △: Type III

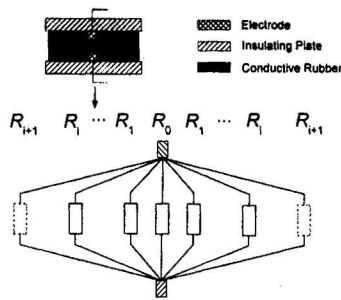


Fig. 4 Approximation of Type III in Testing Materials Which only Has Different Cross-Sectional Area

Tab. 2 Accuracy of Linear Fitting

Sample	C ^{a)}	C ^{b)}	C ^{c)}
S1	0.719	0.811	0.819
S2	0.847	0.945	0.95
S3	0.883	0.965	0.968

experimental data acquired by a: Type I; b: Type II;

c: Type III

(1) 炭黑体积分数接近渗流体积分数时, NPCR 效应非线性强,其主因为电阻率的非线性减小。当炭黑体积分数处在渗流区时, NPCR 效应的非线性特性较强,其主因为电阻率的非线性减小以及导电橡胶应力-应变关系的非线性特性。当炭黑体积分数处在传导区时, NPCR 效应的非线性特性弱,其主因为导电橡胶应力-应变关系的非线性。

(2) 由于界面压阻效应以及力敏导电炭黑/橡胶近似不可压缩体的性质,用于获取 NPCR 效应的电极分布形式也会对 NPCR 效应的非线性存在影响。将电极直接覆于力敏导电炭黑/橡胶表面时获取的 NPCR 效应线性特性差;而将电极制成较小形状,嵌入力敏导电炭黑/橡胶内部获取的 NPCR 效应线性特性较好。

参考文献:

[1] Shimojo M, Namiki A, Ishikawa M, et al. A tactile sensor sheet using pressure conductive rubber with electrical wires stitched method [J]. IEEE Sens. J., 2004, 4(5): 589-596.
 [2] Qu S Y, Wong S C. Piezoresistive behavior of polymer reinforced by expanded graphite [J]. Compos. Sci. Technol., 2007, 67: 234-

- 237.
- [3] Yang Y J, Cheng M Y, Chang W Y, *et al.* An integrated flexible temperature and tactile sensing array using PF copper films [J]. *Sens. Actuators A*, 2008, (143): 143-153.
- [4] 郑强, 沈烈, 李文春, 等. 导电粒子填充 HDPE 复合材料的非线性导电特性与标度行为[J], *科学通报*, 2004, 49(22): 2257-2267.
- Zheng Q, Shen L, Li W C, *et al.* Reversible nonlinear conduction behavior for HDPE/CB composites [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(22): 2257-2267.
- [5] 刘平, 黄英, 仇怀利, 等. 力敏导电橡胶中的应变和压阻效应及工作原理分析[J]. *高分子材料科学与工程*, 2011, 27(5): 112-115.
- Liu P, Huang Y, Qiu H L, *et al.* Strain and piezoresistive effect in working principle of pressure sensitive conductive rubber [J]. *Polym. Mater. Sci. & Eng.*, 2011, 27(5): 112-115.
- [6] 王鹏, 丁天怀, 徐峰, 等. 炭黑填充型导电复合材料的压阻计算模型及实验验证[J]. *复合材料学报*, 2004, 21(6): 34-38.
- Wang P, Ding T H, Xu F, *et al.* Piezoresistivity of conductive composites filled by carbon black particles [J]. *Acta Mater. Compos. Sinica*, 2004, 21(6): 34-38.
- [7] Huang Y, Liu P, Zhang Y G, *et al.* Piezoresistive characteristic of conductive rubber for flexible tactile sensor [J]. *J. Wuhan Univ. Technol.: Materials Science Edition*, 2011, 26(3): 443-448.

Nonlinear Characteristic of Pressure Sensitive Sensor Based on Conductive Rubber Filled by Carbon Black

Ping Liu^{1,2}, Ying Huang^{2,3}, Chao Lian³, Hongsheng Jiang³, Xiumei Liu³, Xiaowen Zhao³

(1. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Institute of Intelligence Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3. School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

ABSTRACT: Nonlinear behavior of pressure-sensitive sensor based on conductive rubber filled by carbon black was analyzed by comparing the influence of resistivity and stress-strain relation on the negative pressure characteristic of resistance (NPCR). It is concluded that if the carbon black contents are close to seepage volumes, because of resistivity nonlinear variation, the stronger nonlinearity of the NPCR is obtained. If the carbon black contents are in percolation zone, strong nonlinearity of the NPCR obtained is due to stress-strain and resistivity nonlinear variation. If the carbon black contents are in conductive zone, weak nonlinearity of the NPCR is obtained as a result of stress-strain nonlinear variation. Moreover, due to the interface piezoresistive effect and the nature of similar incompressible, distribution forms of the electrodes used to obtain the NPCR effect will affect the nonlinear behavior of NPCR effect.

Keywords: nonlinear; carbon black; conductive rubber; tactile sensor