

拉伸对涂碳导电复合丝线传感性能的影响

刘 焘, 许钰泓, 邹奉元

(浙江理工大学服装学院, 杭州 310018)

摘要: 用不同股数和捻度的涂碳纤维设计了 12 种导电复合丝线, 通过对导电复合丝线的拉伸研究电阻与伸长率的关系, 并用回归模型分析评价这些导电复合丝线的灵敏度、线性度和电阻变化的稳定性。研究表明: 在拉伸过程中电阻变化较明显地分成两个阶段: 第一阶段拉伸率为 0~11.67%, 电阻变化较慢, 线性度好, 第二阶段拉伸率为 11.67%~25%, 电阻变化快, 线性度相对较差; 随着股数的增加灵敏度逐渐降低; 在第一阶段捻度为 450 T/m 的试样比其他试样线性度好。

关键词: 涂碳纤维; 股数; 捻缩; 线性度; 灵敏度

中图分类号: TS101.922.3 **文献标识码:** A

0 引言

目前, 可测量人体生理参数(生命特征)的智能纺织品主要是将智能纤维通过不同的组合方式制成织物传感器, 植入服装中来实现对人体生理变化的监测^[1]。用来制作织物传感器的方法主要有两种: 在常规纺织品上进行特殊涂层处理和直接用导电纤维进行织造^[2-4]。一般的涂层智能纺织品柔性好, 但存在涂层材料不均匀、易脱落、耐磨耐水洗涤性能较差等不足; 用导电纤维织造的方法能改善织物传感器在水洗后传感性能的衰退, 因此不少学者从纱线结构和织物结构的角度研究提高织物传感器的传感性能^[5-6]。而作为织物单元的纱线, 其结构和纺纱方式也会影响其传感性能^[1,7]。用具有传感特性的纱线制成的智能织物, 其纱线传感性能的优劣会影响智能织物的可靠性和实用性。本文以涂碳纤维(coated carbon fibres)与涤纶长丝混合纱为原料纺制不同结构的导电复合丝线, 通过测量导电复合丝线在拉伸情况下的电阻变化规律, 分析不同股数和捻回数对其线性度和灵敏度的影响, 寻找纺织结构对导电复合丝传感性能的影响, 为设计导电复合丝线织物传感器提供依据。

1 实验

1.1 实验用原材料

导电丝线采用日本钟纺(Kanebo)公司的涂碳纤维, 型号为 Belltron 9RW-75, 由 3 根涂碳纤维与涤纶丝束加捻得到, 其中涂碳纤维是采用复合纺丝工艺将导电的碳粉与熔融状的尼龙充分混合后, 经特殊喷丝孔与基体尼龙复合形成, 其外层为具有高导电性能的超薄皮状导电质。

原材料相关参数: 断裂伸长率 53.2%, 电阻率 $\rho = 7.8 \times 10^2 \Omega/\text{mm}$, 规格为 10.55 tex/39f, 捻度为 150 T/m。

1.2 样本制备

根据原材料股数和捻度的不同制备 12 组试样,如表 1 所示。

表 1 实验样本

试样	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
股数	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4
涂碳纤维根数	6	6	6	6	9	9	9	9	12	12	12	12
捻度/(T/m)	0	150	300	450	0	150	300	450	0	150	300	450

试样加捻用 Y331LN/PC 型数字式纱线捻度仪在温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $65\% \pm 2\%$ 的恒温恒湿室内,按照 GBT2543.2—2001 进行。试样夹持长度为 $(500 \pm 1)\text{mm}$,预加张力根据股数的不同分别设定为 10、15、20 cN。加捻完成后,将其平移至板上固定防止退捻。

1.3 导电复合丝线在应变力下的导电性测试

拉伸试验应用日本岛津 AG-1 电子强力仪,用 fluke 289 数字万能表测量导电复合丝线在受到拉伸时的电阻。根据实验要求,用绝缘胶将强力仪的夹头绝缘,避免夹头对样本电阻测量产生影响,再用铜片作为电极,固定在绝缘夹头的内侧,最后用万用表的夹头夹住铜片即可获得电阻值。

强力仪夹头距离设为 60 mm,拉伸速率为 10 mm/min,每拉伸 1 mm,待稳定 3 s 后记录下万用表显示的电阻值,试样共拉伸 15 mm,电阻测量点共 16 个,每种样本测试 5 根。

2 结果与讨论

2.1 模型分析

原材料是由 3 根导电丝和涤纶纤维并合加捻成,因此原材料的电阻可以看作是 3 个等值电阻的并联。根据 N 个相同电阻并联的计算公式推出 n 股原材料并捻的总电阻:

$$R_T = \frac{R_0}{\varepsilon_n} \quad (1)$$

在物理学中,具有圆形截面的均匀材质的单根纤维电阻为:

$$R_0 = \frac{\rho L}{A} \quad (2)$$

其中 ρ 为纤维电阻率, L 为长度, A 为导体截面积。

假设导电纤维是均匀的圆柱导体,则由公式(1)(2)可得到导电复合丝线的总电阻:

$$R_T = \frac{\rho L}{3nA} \quad (3)$$

在试样加捻的过程中不同的捻度和股数会产生不同的捻缩,相同长度但不同捻度和股数的试样,由于加捻产生的捻缩使其内部所含的导线原丝长度也发生了变化,捻缩越大,试样的实际电阻也越大,因此试样实际电阻比用公式(3)计算出来的电阻要大。假设各试样在制备时的平均捻缩为 s ,由于加捻时的夹持长度为 500 mm,每捻缩 1 mm 就有 $s/500$ 的相对捻缩,则样本实际电阻:

$$R_A = \frac{\rho L \left(1 + \frac{s}{500}\right)}{3nA} \quad (4)$$

样本制备时,各试样的平均捻缩经测定如表 2 所示。

表 2 样本的捻缩

样本	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
捻缩/mm	0	2	4	9	0	3	5	13	0	4	8	18

导电涂层厚度 $d_1 = 4.5 \mu\text{m}$,单根导电丝直径 $d_2 = 26.9 \mu\text{m}$ ^[8],经计算得导体部分截面积 $S = 3.16 \times 10^{-4} \text{mm}^2$,又电阻率 $\rho = 7.8 \times 10^2 \Omega \cdot \text{mm}$,得电阻理论计算公式:

$$R_A = 0.8228 \frac{L \left(1 + \frac{s}{500}\right)}{n} \quad (5)$$

2.2 实验值的验证

通过测量试样未拉伸状态电阻的实际值,并根据试样的长度 L 、捻缩 s 计算出理论值,结果如表 3 所示。

表 3 未拉伸状态下试样电阻的理论值与实际值

样本	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
理论值/ $M\Omega$	24.68	22.03	24.88	25.13	16.47	16.56	16.62	16.88	12.34	12.44	12.54	12.79
实际值/ $M\Omega$	24.63	21.63	25.12	24.54	15.96	16.40	16.58	17.17	11.90	12.02	12.09	13.27
差异率/%	0.23	1.78	0.95	2.35	3.05	0.96	0.27	1.72	3.62	3.36	3.65	3.81

从表 3 中可以看出,未拉伸时试样的实验电阻值与理论值相差百分比在 4% 之内,两者非常接近。

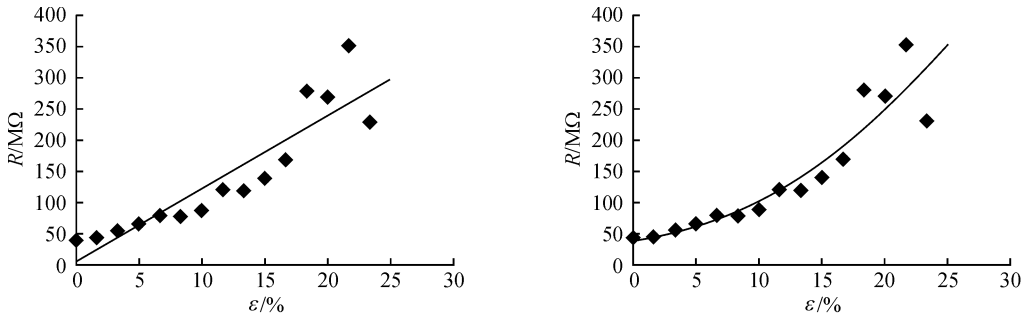
综合表 2、表 3,试样中最大的捻缩为 18 mm,根据样本实际电阻公式,考虑捻缩与不考虑捻缩(即 $s=0$) 时,计算得出的值相差甚微。因此捻缩对实际电阻的影响很小。

2.3 导电复合丝线在应变力下的电阻变化

图 2、图 3 是 5 根试样电阻的平均值与试样伸长率之间的关系。通过曲线拟合找出回归方程,并得到相关性系数 r^2 。相关性系数 r^2 能表明电阻变化曲线的拟合程度,其线性拟合的相关性系数能表明导电复合丝线的线性度,二次拟合的相关性系数 r^2 则能侧面反映电阻变化的稳定性^[1,7,9]。灵敏度系数 GF (gauge factor)可以用拉伸时的电阻变化率($\Delta R/R$)和应变 ϵ ($\Delta L/L$)的比来表征:

$$GF = \frac{\Delta R/R_0}{\epsilon} = \frac{(R-R_0)/R_0}{\epsilon} \tag{6}$$

公式中的 R 为拉伸后的电阻, R_0 为初始电阻, ϵ 为复合丝线的伸长率。



线性拟合: $y=11.77x+4.110$ $r^2=0.817$

二次拟合: $y=0.417x^2+2.024x+39.32$ $r^2=0.859$

图 2 原材料电阻—应变关系

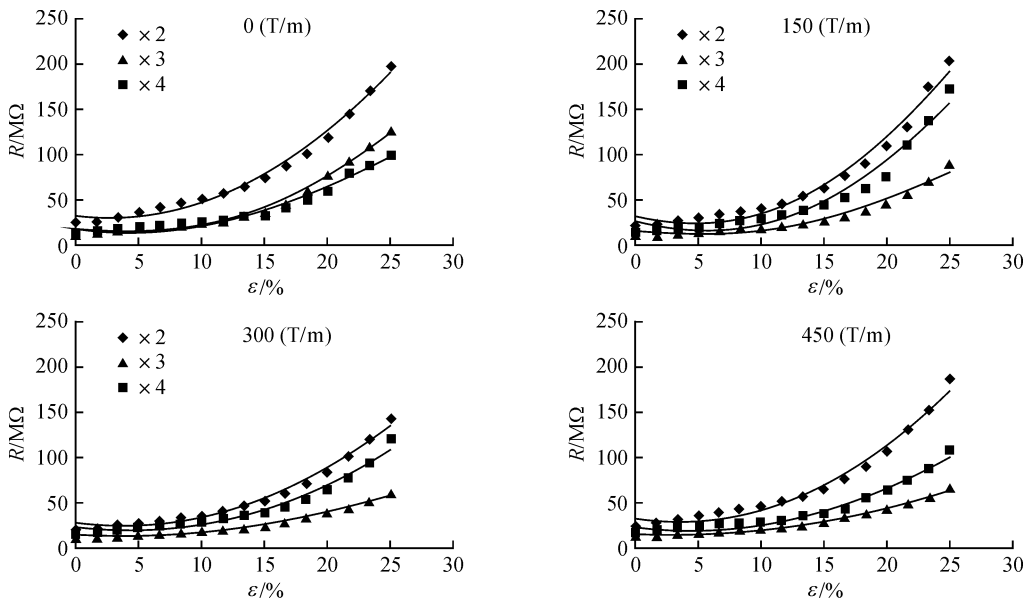


图 3 不同捻度电阻—应变关系

注: $\times 2$ 表示 2 股的试样

因此可以通过对 GF 和相关性系数 r^2 这两项指标的比较找出灵敏度和线性度好的试样。回归结果和 GF 计算结果在表 4 中列出。

表 4 导电复合丝的回归方程和 r^2 值

样本	R_{ϵ} (线性回归)	r^2	R_{ϵ} (二项式回归)	r^2	GF
原材料	$y=11.77x+4.110$	0.817	$y=0.417x^2+2.024x+39.32$	0.859	29.834
1	$y=7.777x-10.56$	0.706	$y=0.440x^2-3.363x+35.37$	0.815	28.237
2	$y=7.472x-15.90$	0.789	$y=0.465x^2-4.899x+35.83$	0.968	26.386
3	$y=3.485x+8.872$	0.86	$y=0.200x^2-0.926x+23.86$	0.969	21.165
4	$y=6.877x-8.005$	0.724	$y=0.478x^2-5.581x+43.08$	0.925	26.386
5	$y=3.073x+3.545$	0.794	$y=0.158x^2-0.621x+17.00$	0.892	27.457
6	$y=4.313x-3.138$	0.719	$y=0.341x^2-3.528x+24.91$	0.918	25.888
7	$y=3.435x+1.676$	0.818	$y=0.216x^2-1.973x+22.71$	0.969	25.009
8	$y=2.771x+8.329$	0.825	$y=0.163x^2-0.905x+21.16$	0.945	17.337
9	$y=3.387x-2.512$	0.786	$y=0.203x^2-1.488x+15.65$	0.91	25.982
10	$y=2.337x+0.842$	0.809	$y=0.157x^2-1.386x+14.52$	0.97	23.861
11	$y=1.607x+4.541$	0.886	$y=0.079x^2-0.369x+12.23$	0.986	17.886
12	$y=1.714x+6.970$	0.792	$y=0.110x^2-0.867x+16.42$	0.96	16.040

从图 2、图 3 以及表 4 的拟合结果中得知,电阻在外力拉伸下的变化接近于开口向上的抛物线的右侧曲线,也就是电阻在拉伸过程中递增。这是因为试样在拉伸过程中,纤维的相互挤压使导通的横截面积逐渐变小,长度增加,电阻增大。

原材料的二次拟合相关性系数 r^2 比绝大部分试样要小,拟合程度低,即电阻变化的稳定性差。4 股的试样整体上比 2 股和 3 股的试样拟合程度好,说明 4 股的试样电阻变化的稳定性较好,因为 4 股内所含的导电纤维根数多,导电纤维之间的接触几率大,在拉伸过程中其导通横截面积的变化相对于导电纤维根数少的试样要小,从而电阻的变化也小。

通过公式(6)可以计算出灵敏度 GF 的值, GF 值越小,灵敏度就越低,反之,灵敏度越高。从表 4 中可知,2 股的试样灵敏度 GF 数值普遍较高,最高达 28.237;4 股的试样灵敏度相对较低,最低为 16.040。股数的变化主要引起电阻 R_0 的变化,并且股数多的复合丝线其内部的涂碳纤维所分担的拉力要比股数少的复合丝线小,因此电阻的增量也减小,公式(6)中, $R-R_0$ 减小, R_0 减小,所以灵敏度 GF 也相应变小。

对于股数相同捻度不同的试样,其稳定性和灵敏度也存在一定的规律,总体来说捻度为 300 T/m 的试样,相关性系数 r^2 高,即稳定性较好。

2.4 不同拉伸阶段内导电复合丝线的电阻变化

通过对实验结果进行分段拟合,计算显示以 7 mm 作为分段点能使前后 2 段拟合的 r^2 值达到最大,因此可以将电阻的变化以 $\Delta L=7$ mm 为转折点分成两阶段,分段拟合的结果如表 5。

表 5 导电复合丝线的回归方程和 r^2 值

样本	$R-\epsilon(0\sim 7\text{ mm})$	r^2	$R-\epsilon(>7\sim 15\text{ mm})$	r^2
原材料	$y=5.106x+39.15$	0.979	$y=18.33x-114.1$	0.614
$\times 2,0s$	$y=2.920x+22.26$	0.989	$y=11.53x-101.0$	0.967
$\times 2,150s$	$y=2.106x+20.51$	0.994	$y=12.74x-131.2$	0.942
$\times 2,300s$	$y=1.673x+19.12$	0.988	$y=7.394x-59.31$	0.963
$\times 2,450s$	$y=2.309x+24.12$	0.997	$y=10.31x-90.38$	0.965
$\times 3,0s$	$y=1.212x+13.31$	0.986	$y=6.147x-57.60$	0.971
$\times 3,150s$	$y=1.571x+14.09$	0.986	$y=11.41x-131.9$	0.915
$\times 3,300s$	$y=1.378x+15.34$	0.986	$y=7.015x-68.61$	0.928
$\times 3,450s$	$y=1.202x+17.33$	0.994	$y=5.275x-40.43$	0.972
$\times 4,0s$	$y=1.265x+11.01$	0.990	$y=8.528x-91.21$	0.979
$\times 4,150s$	$y=0.910x+9.844$	0.989	$y=5.456x-56.69$	0.93
$\times 4,300s$	$y=0.783x+10.36$	0.985	$y=3.342x-26.83$	0.972
$\times 4,450s$	$y=0.862x+12.91$	0.996	$y=3.407x-23.29$	0.965

注: $\times 2$ 为 2 股并合; $y:R/M\Omega$; $x:\epsilon/\%$

分段进行线性回归后,两阶段斜率的比较,0~7 mm 阶段的回归系数比>7~15 mm 阶段的回归系数小,说明前一阶段比后一阶段的电阻变化慢,灵敏度低。

在0~7 mm 阶段的相关性系数 r^2 最低有0.979,最大能达到0.996,说明这个阶段的电阻变化基本趋向于直线,变化稳定。对于>7~15 mm 阶段,相关性系数低于0~7 mm 阶段,说明导电复合丝线拉伸到7 mm 后,其电阻值的变化越来越不稳定。

在分段的情况下试样捻度的影响比较明显,0~7 mm 阶段,捻度为450 T/m 的试样拟合程度比其他试样好,而在>7~15 mm 阶段,无加捻的并股试样拟合程度较好,稳定性高。理论上,加捻试样的导电纤维抱合比较紧密,纤维之间的摩擦力比无加捻试样大,因此在拉伸过程中导通横截面积的变化相对要稳定,但导电纤维本身具有的转曲使它一开始就受到了一定的张力,后阶段的拉伸使导电纤维的形变大于无加捻试样。因此后阶段无加捻试样的电阻变化比加捻试样稳定。

3 结 论

a)导电复合丝线未拉伸时,其实际电阻与计算理论值非常接近,相差百分比在4%之内。对于本文所选取的材料,捻缩对导电复合丝线电阻值的变化影响不大。但随着复合丝线股数的增多,长度的增加,影响增大。

b)导电复合丝线在拉伸力的作用下其电阻变化曲线总体接近于开口向上的抛物线。但比较明显地可分成两个阶段:拉伸范围为0~7 mm(拉伸率0~11.67%)内,电阻变化较慢,线性度好;在>7~15 mm(拉伸率11.67%~25%)内电阻变化幅度明显增大。

c)股数越多,即导电纤维根数越多,线性度越好,但拉伸变化的灵敏度较低。反之,股数越少,线性度越低,灵敏度高。本文中4股的试样稳定性、线性度好,但灵敏度低。因此,用于制作智能服装中传感器的导电复合丝线在灵敏度达到最低要求的情况下可增加并合根数来提高线性度。

d)对于受拉伸范围小的织物传感器,导电复合丝线适当加捻,捻度为300~450 T/m,可以提高其线性度。

参考文献:

- [1] Huang Ching-tang, Tang Chien-fa, Lee Ming-chen, et al. Parametric design of yarn-based piezoresistive sensors for smart textiles[J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, 148: 10-15.
- [2] Wilhelm Frank H. The life shirt: an advanced system for ambulatory measurement of respiratory and cardiac function[B/OL]. [2002-09-10]. www.vivometrics.com/corporate/publications.
- [3] Lam S, Tang Po. Recent developments in flexible wearable electronics for monitoring applications[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2007, 29: 283-300.
- [4] Coosemans J. Integrating wireless ECG monitoring in textiles[C]. *Sensors and Actuators A: Physical. The 13th International Conference on Solid-State Sensors*, 2006, 130: 48-53.
- [5] Strazdienė E, Blaževič P, Vegys A, et al. New tendencies of wearable electronics application in smart clothing[J]. *Electronics and Electrical Engineering*, 2007, 73: 21-24.
- [6] 杨 斌,陶肖明,俞建勇. 不锈钢纤维织物的电阻与应变关系[J]. *稀有金属材料与工程*, 2006, 35: 96-99.
- [7] Huang Ching-tang, Shen Chien-lung, Tang Chien-fa, et al. A wearable yarn-based piezo-resistive sensor[J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, 141: 396-403.
- [8] 廖丽芳. 柔性可纺织涂碳纤维导电/传感性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2010: 24-25.
- [9] Zhang H, Tao X M, Yu T X, et al. Conductive knitted fabric as large-strain gauge under high temperature[J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, 126: 129-140.

Effects on the Sensitivity of Carbon-Coated Filaments by Elongation

LIU Tao, XU Yu-hong, ZOU Feng-yuan

(School of Fashion, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, 310018, China)

Abstract: This article studies the sensitivity of 12 kinds of carbon-coated filaments fabricated by different number of shares and twists, observes the relationship between resistance and elongation under tension, and evaluates the sensitivity and linearity of carbon-coated filaments using regression model. It is shown that the resistance variational trends are present differently in two different periods during the whole extension: The resistance varies stably in the first phase (0~11.67%) but fast in the second one (11.67%~25%); the sensitivity of carbon-coated filaments becomes lower as the number of shares decreases. The carbon-coated filaments with 450T/M has higher linearity during the first phase.

Key words: coated carbon fibers; strands; twist shrinkage; textile sensors; sensitivity

(责任编辑: 张祖尧)

(上接第 514 页)

Study on Different Surfactants in Improving Dyeing Performance of PLA Fiber

DANG Xiao-nan^a, ZHENG Jin-huan^{a,b}, FU Jian-jian^a, CHEN Cai-yun^a

(Zhejiang Sci-Tech University, a. The Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education; b. Engineering Research Center for Eco-Dyeing & Finishing of Textiles, Ministry of Education, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Bisoctyl Dimethyl Ammonium Bromide(D821) and Didecyl Dimethyl Ammonium Bromide (D1021) are two kinds of more effective surfactants in improving dyeing property of PLA fiber dyed with disperse dyes, which are found after different ion kinds of surfactants are selected. There are two aspects of the principle about the two kinds of cationic Gemini surfactant. On the one hand, the surfactant can increase the solubility of disperse dyes in the dye bath, on the other hand, the surfactant has strong adsorption to the PLA fiber, which are beneficial to shift more disperse dyes to PLA fiber from the dye bath. In comparison, D1021 is better in improving the solubility of disperse dye and higher stronger adsorption on PLA fiber than D821.

Key words: disperse dye; PLA fiber; surfactant

(责任编辑: 许惠儿)