

DOI:10.16549/j.cnki.issn.1001-2044.2018.11.008

基于纳米纤维包芯纱的压力传感器的制备及性能表征

佑晓露^{1,2}

(1.中原工学院 纺织学院,河南 郑州 450007; 2.纺织服装河南省协同创新中心,河南 郑州 450007)

摘要:利用化学镀镍法制备一种柔性的导电棉纱电极,通过静电纺丝技术将纳米纤维包覆在镀镍棉纱表面作为介电层,设计得到了一种基于PU纳米纤维包芯纱的柔性电容式压力传感器。利用扫描电子显微镜对纳米纤维以及棉纤维的形貌进行表征,并通过数字源表和LCR电桥仪对纱线以及传感器的性能进行表征。结果表明:镀镍棉纱的电导率随着镀镍时间的延长而增大,当镀镍时间为8 h时,其电导率为25 S/cm,时间超过8 h后,电导率变化不大;镀镍后的棉纱显示出良好的力学性能;另外,基于纳米纤维包芯纱的压力传感器具有良好的传感性能,其灵敏度平均可达到0.375 N。

关键词:纳米纤维;静电纺丝;包芯纱;电导率;压力传感器

中图分类号: TM938.86

文献标识码: B

文章编号: 1001-2044(2018)11-0024-04

Preparation and properties characterization of pressure sensor based on nanofiber core-spun yarn

YOU Xiaolu^{1,2}

(1. School of Textiles, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

(2. Henan Collaborative Innovation Center for Textile and Clothing, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: A flexible conductive cotton yarn electrode is prepared by electroless nickel plating. Nanofibers are coated on the surface of nickel-plated cotton yarns as a dielectric layer by electrospinning technology and a flexible capacitive pressure sensor based on PU nanofiber core-spun yarn is designed. The morphology of nanofibers and cotton fibers is characterized by SEM, and the properties of yarns and sensors are characterized by Digital Source-meter and LCR meter. The results show that cotton yarn has the highest conductivity. When the nickel plating time is 8 h, the electrical conductivity of the nickel-plated is 25 S/cm. The Ni-coated cotton yarn shows good mechanical properties. In addition, the pressure sensor based on the nanofiber core-spun yarn has good sensing performance and its sensitivity could reach up to 0.375 N.

Key words: nano fiber; electrostatic spinning; core-spun yarn; specific conductance; pressure sensor

静电纺丝技术是制备微纳米纤维的常用方法之一,通过静电纺丝技术制备的纳米纤维具有尺度小、比表面积大、孔隙率高等优点,在服装、仿生、智能材料等领域具有广阔的应用前景^[1-3]。通常,由静电纺丝制得的纳米纤维呈现出无序的、杂乱分布的无纺毡形式,由于其强力低、再加工困难等缺点,限制了纳米纤维的应用。所以,将纳米纤维加捻包覆在常规纺织纱线的表面形成包芯纱,不仅能提高纳米纤维的力学性能,解决二次加工的难题^[4-5],还能使纳米纤维与常规纺织品的优势相结合。这样,纳米纤维就可以借助常规纺织品构建各种具有功能性的材料结构^[6]。刘呈坤等人^[7]提出了一种利用接地平行铝片作为接收装置,使芯纱绕自身纱轴旋转,将取向的纳米纤维卷绕在其表面获得纳米纤维包芯纱的方法。何建新、王鹏等人^[8-9]提出了一种多针头静电纺纳米纤维包芯纱的方法,通过多针头静电纺原理集聚纳米纤维,用旋转的金

属喇叭对纳米纤维进行加捻并包覆在芯纱表面得到纳米纤维包芯纱。在材料表面进行特别的处理,使其表面沉积金属层,也是制备复合材料的常用方法。化学镀工艺有别于电镀工艺,其不需要利用外加电场,而是依靠自催化效应和化学还原反应在材料表面沉积一层均匀的金属镀层。另外,化学镀镍工艺设备简单并且在常规条件下可以大规模生产,这些优势使其在聚对苯二甲酸类塑料(PET)等非金属材料表面的应用越来越广泛^[10-13]。压力传感器在新一代的人工智能产品上有非常重要的地位,如电子皮肤、医疗监测、机器人等方面。压力传感器可以将来自于外界的刺激转化为电学信号(如电阻、电流、电容、电压等),从而达到模拟人类皮肤的目的^[14-15]。

本文利用静电纺丝法获得聚氨酯纳米纤维包芯纱,以纳米纤维层为介电层,以镀镍棉纱为传导电极,设计了一种股线结构的电容式压力传感器。

1 试验

1.1 材料

聚氨酯(PU,相对分子质量160 000),购自巴斯夫

收稿日期:2018-06-25

基金项目:河南省科技创新人才计划(174100510013)

作者简介:佑晓露(1993—),女,硕士研究生,主要从事功能性纳米材料的研究。

聚氨酯特种产品(中国)有限公司;N-N 二甲基甲酰胺(DMF,99.9%)、四氢呋喃(THF,99.9%)、99.9%硫酸镍、96.0%氢氧化钠、98%硼氢化钠、36.0%~38.0%盐酸、99.0%次亚磷酸钠、99.5%氯化铵、99.5%柠檬酸三钠,均购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 纺丝溶液的制备

将PU颗粒溶解在N-N 二甲基甲酰胺和四氢呋喃溶液的混合溶液中(DMF:THF=1:1),在磁力搅拌器上常温搅拌12h,得到质量分数为14%的PU纺丝溶液。

1.3 镀镍棉纱的制备

将16.3 tex(36^S)的棉单纱放入10 g/L的NaOH水溶液中处理1h,温度80℃;烘干后放入质量浓度为0.05 g/mL硫酸镍和0.02 g/mL盐酸水溶液中浸泡10 min,取出后直接放置在0.01 g/mL硼氢化钠和0.01 g/mL氢氧化钠水溶液中反应10 min;之后用去离子水清洗后放置在化学镀镍液中浸泡4h,清洗烘干得到镀镍棉单纱。其中化学镀镍液采用30 g/L硫酸镍、12 g/L次亚磷酸钠、45 g/L氯化铵和25 g/L柠檬酸三钠以及2.5 mL氨水混合配制而成。

1.4 静电纺纳米纤维包芯纱的制备

制备连续的纳米纤维包芯纱的共轭纺纱装置见图1^[16]。

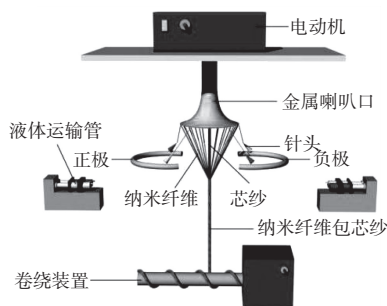


图1 共轭静电纺纳米纤维成纱装置示意图

如图1所示,两组针头对称分布在金属喇叭口的两侧,分别与高压发生器的正负极相连接。金属喇叭口不接地。液体运输管里的纺丝液经过两组对称配置的针头,在电场力的作用下被拉伸成纳米纤维,在芯纱的牵引下,形成一端在芯纱表面,一端在金属喇叭口边缘的中空纤维网,最后经卷绕装置输出纳米纤维包芯纱。试验条件如下:纺丝溶液PU质量分数为14%,纺丝电压为19~21 kV,针头与金属喇叭口的距离为10~17 cm,正极射流量与负极射流量之比为3:1。

1.5 基于股线结构的电容式压力传感器的制备

将两根通过上述方法获得的PU纳米纤维包芯纱加捻制成股线,形成以纳米纤维为介电层,以两根镀镍棉纱为上、下电极的电容式柔性压力传感器,捻回数为3个/cm,见图2。

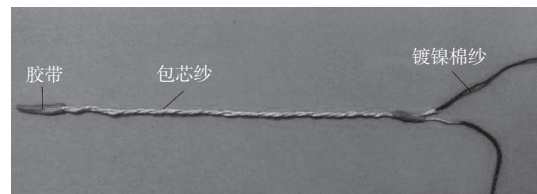


图2 基于股线结构的电容式压力传感器实物图

1.6 扫描电镜分析(SEM)

采用JSM-6360型场发射扫描电子显微镜(SEM)来表征PU纳米纤维的表面形貌以及棉纱线镀镍前后的表面形貌。测试条件:温度20℃,加速电压15 kV。

1.7 力学性能分析

利用美国Instron365型电子强力仪对样品进行拉伸力学性能测试,样品夹持长度15 cm,拉伸速度150 mm/min,初始张力0.2 cN,每种试样测试10次,结果取平均值。

1.8 导电性能分析

在室温条件下,利用KEITHLEY2400型数字源表对镀镍后的棉纱进行电学性能测试,测试长度1 cm。

电导率计算式见式(1):

$$\sigma = \frac{L}{R \cdot S} \quad (1)$$

式中: σ ——电导率,S/cm;

L ——纱线长度,cm;

R ——纱线电阻, Ω ;

S ——纱线横截面积, cm^2

1.9 传感器的压敏性能分析

在室温条件下,利用压力测试机对受测器件施加不同的压力,利用TH2829CLCR型电桥仪收集受测器件产生的电容信号,电桥仪的测试条件为频率1 MHz,电压1 V。

电容计算式见式(2):

$$C = \varepsilon(A/d) \quad (2)$$

式中: C ——交织点电容,F;

ε ——介电常数;

A ——有效接触面积, m^2 ;

d ——电极之间的距离,m

2 结果与讨论

2.1 形貌分析

PU 纳米纤维包芯纱以及镀镍棉纱的电镜图见图 3。

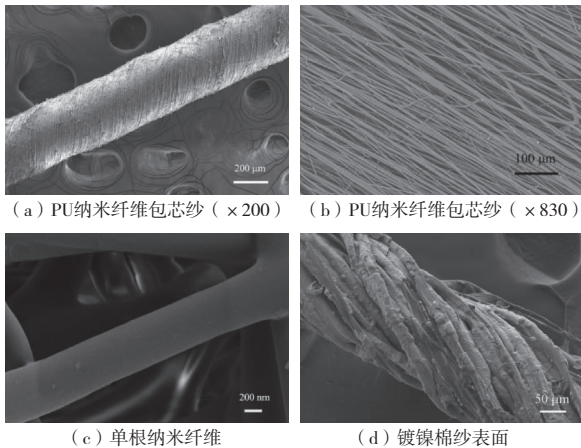


图 3 PU 纳米纤维包芯纱以及镀镍棉纱的 SEM 图

图 3(a) 显示了 PU 纳米纤维包芯纱的 SEM 图片, 表明 PU 纳米纤维包芯纱具有明显的取向和捻度; 图 3(b) 显示了纳米纤维在镀镍棉芯纱表面的取向排列, 纤维平均直径在 500~600 nm; 图 3(c) 显示了 PU 纳米纤维表面光滑, 纤维成丝性能好; 图 3(d) 显示了镀镍后的棉纱表面形貌, 可以看出, 经过化学镀镍的棉纤维内外表面均匀地沉积一层金属镍层。

2.2 力学性能分析

纯棉纱、镀镍棉纱和 PU 纳米纤维包芯纱的力学性能测试结果见图 4。

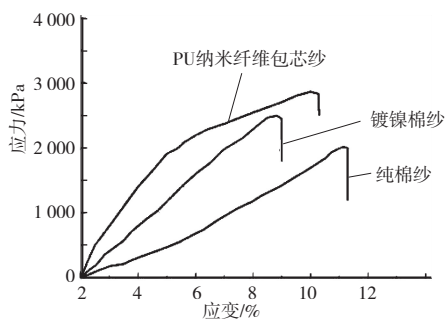


图 4 3 种纱线的应力-应变图

如图 4 所示, 纯棉纱线的应变和应力分别为 9% 和 2 000 kPa; 纯棉纱线经过化学镀镍处理后, 其应力增大到 2 500 kPa, 但应变相对有所减小; 镀镍棉纱包覆 PU 纳米纤维后, 包芯纱的应力和应变均有所提高, 这是因为包覆纳米纤维后, 芯纱变得紧密, 在拉伸过程中不易滑脱, 增大了纤维间的摩擦力。

2.3 镀镍棉纱的导电性能分析

棉纱经过化学镀镍工艺得到导电镀镍棉纱, 镀镍时间对镍在棉纱上的沉积率有很大的影响。在不同镀

镍时间(2、4、6、8、10 h)下镀镍棉纱的导电性能测试结果见图 5。

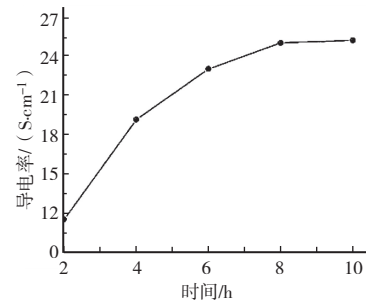


图 5 不同镀镍时间对镀镍棉纱电导率的影响

如图 5 所示, 当镀镍时间为 2、4、6 h 时, 镀镍棉纱电导率随着时间的延长而增加, 分别为 11.57、19.11、22.94、25 S/cm; 但是当镀镍时间超过 6 h, 电导率的增加趋势变缓。当镀镍时间为 8 h 时, 镀镍棉纱电导率为 25 S/cm。这是因为当镀镍时间过短时, 镀镍液中的镍离子不能充分地沉积在棉纤维表面, 但是当镀镍时间充分时, 镍离子已经紧密地分布在棉纤维表面, 其余镍离子无法继续沉积, 因此电导率几乎不变。

2.4 压敏性能分析

由两根包芯纱加捻形成的基于股线结构的电容式压力传感器的传感机理图见图 6。

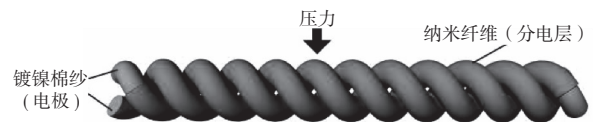


图 6 基于股线结构的电容式压力传感机理示意图

如图 6 所示, 与平板电容器类似, 镀镍棉纱外的纳米纤维充当绝缘的介电层, 两根镀镍棉纱分别充当上下电极。当施加压力到交结点时, 外力使股线压缩, 上下电极之间的距离 d 变小, 接触面积 A 变大, 最终使交结点电容 C 变化。

传感器在不同压力下的电容响应见图 7。如图 7(a) 所示, 随着传感器所受的外部压力越来越大, 电容不断增大。当压力 < 0.25 N 时, 其平均灵敏度达到 0.375 N。这是因为随着外部压力的增加, 镀镍棉纱电极间的距离不断减小, 纳米纤维介电层的接触面积不断增大, 使电容不断增大。图 7(b) 显示了压力传感器在压力 0.5 N 下的静态电容响应, 表明其电容具有良好的稳定性。该压力传感器在不同压力下的动态电容变化见图 7(c), 压力分别为 0.02、0.1、0.2、0.5、1、2 N, 可见压力越大, 电容越高。

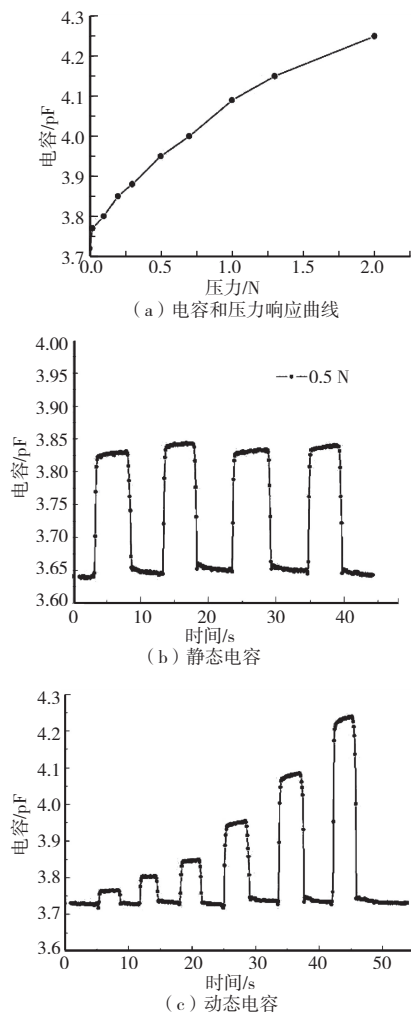


图7 基于股线结构的电容式压力传感器电容响应曲线

3 结语

本文采用化学镀镍法制备了镀镍棉纱作为导电芯纱,通过共轭静电纺丝技术,制备出基于PU纳米纤维包芯纱的电容式压力传感器,研究了棉纱镀镍前后以及包芯纱的表面形貌、力学性能,并对镀镍棉纱的导电性和传感器的传感性能进行探究。研究表明,镀镍棉纱具有优异的电导率,传感器对压力具有良好的响应性能,其在人工智能产品领域的应用具有一定价值。

参考文献:

[1] 钟智丽,王训该.纳米纤维的应用前景[J].纺织学报,2006,27(1):107-110.

[2] SUNDARRAJAN S, RAMAKRISHNA S. Fabrication of nanocomposite membranes from nanofibers and nanoparticles for protection against chemical warfare stimulants[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(20):8400-8407.

[3] 包广弟,力尚昆,卢晓峰,等.静电纺丝技术制备无机纳米纤维材料的应用[J].高等学校化学学报,2013,34(1):15-29.

[4] FAKHRAI A, EBADI S V, GHAREHAGHAI A A, et al. Analysis of twist level and take-up speed impact on the tensile properties of PVA/PA6 hybrid nanofiber yarns[J]. E-Polymers, 2016, 16(2):125-135.

[5] ZHOU Y M, HE J X, WANG H B, et al. Carbon nanofiber yarns fabricated from co-electrospun nanofibers[J]. Materials & Design, 2016(95):591-598.

[6] Greiner, 刘呈坤, 金立国. 静电纺纳米纤维的应用[J]. 合成纤维, 2008, 37(3):45-51.

[7] 刘呈坤, 贺海军, 孙润军, 等. 纺丝工艺对静电纺纳米纤维包芯纱包覆性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(12):82-86.

[8] 何建新, 张明军, 崔世忠, 等. 纳米纤维包芯纱的制备与表征[J]. 上海纺织科技, 2014(8):54-56.

[9] 王鹏, 周玉嫚, 管声启, 等. 多喷头喷气静电纺纳米纤维包芯纱制备[J]. 西安工程大学学报, 2015(4):467-470.

[10] PARIPOVIC D, KLOK H A. Polymer brush guided formation of thin gold and palladium/gold bimetallic films[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2011, 3(3):910-917.

[11] YU Y, ZENG J, CHEN C, et al. Three-dimensional compressible and stretchable conductive composites[J]. Advanced Materials, 2014, 26(5):810-815.

[12] 曾林, 李宁, 黎德育. PET表面低温碱性化学镀镍工艺[J]. 材料保护, 2009, 42(6):36-38.

[13] 张颖, 王晓轩, 李涛, 等. 钨合金表面化学镀镍工艺[J]. 电镀与涂饰, 2006, 25(3):8-12.

[14] YOON S G, PARK B J, CHANG S T. Highly sensitive piezocapacitive sensor for detecting static and dynamic pressure using ion-gel thin films and conductive elastomeric composites[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2017(9):36206-36219.

[15] LOU Z, CHEN S, WANG L, et al. An ultra-sensitive and rapid response speed graphene pressure sensors for electronic skin and health monitoring[J]. Nano Energy, 2016(23):7-14.

[16] 齐琨, 何建新, 周玉嫚, 等. 多重共轭静电纺纳米纤维的成纱工艺[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2013, 39(6):710-715.

欢迎订阅《合成纤维》杂志!

单月刊 邮发代号: 4-238

编辑部电话:(021)55210011-458 电子邮件:hcxw@chinajournal.net.cn

地址:上海市平凉路988号 邮编:200082