

# CNT/PP 编织绳的力学和电学性能研究

邢雯雯, 伍渝菲, 姚奕豪, 徐立婷, 武依婷

(上海工程技术大学 纺织服装学院, 上海 201600)

**摘要:** 为拓展碳纳米管(CNT)的应用,创新性地 将 CNT 涂覆在聚丙烯(PP)纱线上,制备具有传感及电热功能的 CNT/PP 编织绳。对不同编织根数 CNT/PP 编织绳的直径、力学性能、导电性能等进行测试分析。研究表明:相比于不导电的 PP 编织绳,CNT/PP 编织绳的电阻明显减小,且会产生电热效应。随着编织根数的增加,CNT/PP 编织绳的断裂强力增大,电阻减小,电热性能提高。涂覆 CNT 后,CNT/PP 编织绳的断裂强力和断裂伸长量较原始的 PP 编织绳均有所下降。

**关键词:** 碳纳米管(CNT); 编织绳; 涂覆; 应变电阻; 传感

**中图分类号:** TS 159

**文献标志码:** A

## Study on the mechanical and electrical properties of CNT/PP braided rope

Xing Wenwen, Wu Yufei, Yao Yihao, Xu Liting, Wu Yiting

(School of Textiles and Fashion, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China)

**Abstract:** In order to expand the application of carbon nanotube (CNT), the experiment innovatively coated CNT on polypropylene (PP) yarn to make a CNT/PP braided rope with sensing and electric heating function. The diameter, mechanical properties and electrical conductivity of CNT/PP braided ropes with different braided number are tested and analyzed. The results show that compared with non-conductive PP braided rope, the resistance of CNT/PP braided rope is obviously reduced, and the electric heating effect will be produced. With the increase of the braided number, the breaking strength of CNT/PP braid rope increases, the resistance decreases, and the electric heating performance increases. However, after the coating of CNT, the breaking strength and breaking elongation of CNT/PP braided rope are lower than that of the original PP braided rope.

**Key words:** carbon nanotube(CNT); braided rope; coat; strain resistance; sense

近年来,智能纺织品在工业界和学术界得到越来越多的关注。智能纺织品是一种将纺织品与先进电子技术结合的前沿纺织材料,它实现了纺织品的多种智能功能与增强性能<sup>[1]</sup>。智能纺织品的材料种类涵盖导电性纤维及其制品,其最重要的特征是具备足够的导电性,能够确保电流传输的有效性,从而实现可靠的传感器、电池和其他电子功能<sup>[2]</sup>。当前,导电纤维传感器的主要材料为高导电性的纳米材料,包括碳纳米材料(碳纳米管、碳纳米线、石墨烯等)、导电高聚物、MXene、金属纳米线和液态金属

等<sup>[3]</sup>。其中,碳纳米管因其优异的电学、光学、力学和热学性能,在智能纺织品研究领域具有广阔的应用前景。

基于碳纳米管(CNT)的导电纱线种类多样。如,纯碳纳米管纱线,它具有高强度、高导电性和应变传感性能等诸多特性,是智能纺织品领域理想的纱线材料。但目前纺丝得到的碳纳米管纱线内部结构松散,纤维间相互作用较弱,导致碳纳米管的优异性能不能在宏观尺度上进行有效传递<sup>[4]</sup>。有研究将碳纳米管纤维与其他纤维复合加捻制备导电纱线,

收稿日期: 2024-03-10

作者简介: 邢雯雯,女,2004年生,河南新乡人,硕士,研究方向为碳纳米管材料性能探究,1517412139@qq.com

如王英明<sup>[5]</sup>采用该方法制备出具有大应变、高频响应特性的鞘-芯碳纳米管复合纤维人工肌肉。但 CNT 纤维及 CNT 纱线的制作成本较高,因而制作成本较低的 CNT 溶液受到广泛关注。基于 CNT 的导电纱线最常见的制备方法是在纱线表面涂覆碳纳米管。张雨晴等<sup>[6]</sup>采用浸渍的方法在氨纶长丝表面涂覆 CNT,得到碳纳米管涂层氨纶复合传感材料,并探究了其性能及应用。结果显示,所得碳纳米管涂层氨纶传感材料具有良好的应变响应稳定性,在小应变传感领域具有潜在应用前景。

为进一步拓展碳纳米管的应用,本文参考近年来的相关研究,创新性地将在 CNT 涂覆在丙纶(PP)纱线上,制备具有传感及电热功能的 CNT/PP 编织绳。其中,CNT 溶液是作为涂覆材料,涂覆在 PP 纱线上的,待其干燥后再进行编织,编织成绳后再次涂覆 CNT,以改善 CNT 脱落的问题。此外,还通过改变编织根数,探究不同编织根数对 CNT/PP 编织绳性能的影响。

## 1 试验部分

### 1.1 材料

试验使用的 TNWDMC-MC8 型多壁碳纳米管水性分散液由成都中科时代纳能科技有限公司提供;试验纱线为线密度 12.8 tex/106 f(115 D/106 f)的丙纶纱线。

### 1.2 仪器

Cool Maker 手摇编织机(SPIN MASTER 公司);直板夹(奥克斯公司);高清 CCD 测量显微镜;XS(08)F2 系列织物强力机;Keysight 34461A 型数字万用表;电热仪。

### 1.3 CNT/PP 编织绳的制备

试验通过控制编织根数,制备 4 种不同的 CNT/PP 编织绳。首先,将 PP 单纱放入 CNT 溶液中浸泡 10 min,取出用直板夹将其加热至干燥,重复上述浸泡和加热操作 4 次;其次,使用手摇编织机将浸渍后的 PP 单纱分别编织成截面含 5、6、7 和 8 根单纱的编织绳;最后,将 4 种不同的编织绳放入 CNT 溶液中浸泡 10 min,取出用直板夹加热至干燥,重复上述浸泡和加热操作 4 次,得到 4 种 CNT/PP 编织绳试样。

### 1.4 PP 编织绳的制备

使用手摇编织机将未浸渍 CNT 溶液的 PP 单纱分别编织成截面含 5、6、7 和 8 根单纱的 PP 编织绳,作为对试样。

## 1.5 性能测试

### 1.5.1 直径测试

采用高清 CCD 测量显微镜对 PP 编织绳和 CNT/PP 编织绳的结构形貌进行观测并拍照。

### 1.5.2 力学及电学性能测试

采用两探针法,通过数字万用表测试 CNT/PP 编织绳的电阻,测试样品长度为 20 mm,样品两端采用导电银胶与铜丝黏结后作为电极,银胶在恒温烘箱中烘干。将样品夹持在织物强力机上,夹距设定为 10 mm、拉伸速度为 50 mm/min,测试 CNT/PP 编织绳的动态电阻以及力学性能。

将 PP 编织绳样品夹持在织物强力机上,夹距设定为 10 mm、拉伸速度为 50 mm/min,测试 PP 编织绳的力学性能。

### 1.5.3 电热性能测试

采用电热仪平行夹持住 CNT/PP 编织绳,在其两端施加电压,分别通入 2、3、4、5 和 6 V 电压,测试 CNT/PP 编织绳的电热性能。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 直径分析

不同编织根数 PP 编织绳的电子显微镜图如图 1 所示。可以看出,随着编织根数的增加,PP 编织绳的直径增大,且各 PP 编织绳的编织结构较为均匀。

不同于 PP 编织绳,浸渍 CNT 后的 CNT/PP 编织绳(无论是否再次浸渍)编织结构较不均匀;随着编织根数的增加,编织绳的直径变化不明显,且编织后再次浸渍 CNT 的编织绳,其 CNT 的分布也不均匀,如图 2 所示。

在加热浸渍 CNT 的单纱时,直板夹会促使涂覆的 CNT 在单纱上均匀分布,但同时其也会带走大量的 CNT。因此,需重复多次涂覆 CNT 操作。然而,编织过程中,涂覆在单纱表面的 CNT 极易脱落,造成纱线表面 CNT 分布不均匀,而脱落的 CNT 还会导致后续编织加工中编织机卡顿,以及纺纱张力不均,进而造成编织结构不均匀。

### 2.2 力学性能分析

不同编织根数编织绳的力学性能测试结果如图 3 所示。可以看出,随着编织根数的增加,编织绳的断裂强力逐渐增大,但断裂伸长量未呈现明显的变化规律。随着编织根数的增加,编织绳的纵向强力增加,纤维之间的抱合力增大,因此断裂强力增大。由于编织时纱线张力不均匀,且单纱上的 CNT

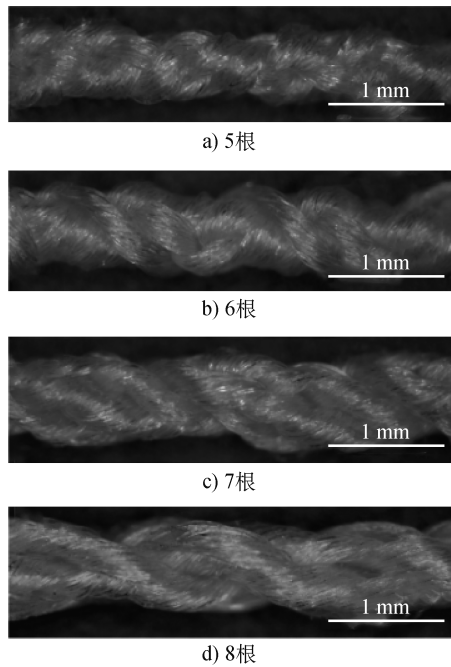


图 1 不同编织根数 PP 编织绳的电子显微镜图  
Fig. 1 Electron microscope images of PP braided ropes with different braided number

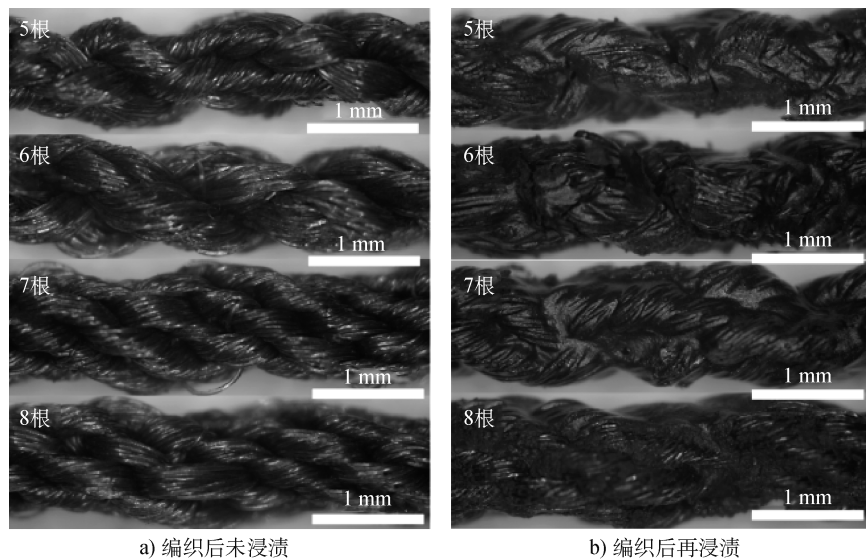


图 2 不同编织根数 CNT/PP 编织绳的电子显微镜图  
Fig. 2 Electron microscope images of CNT/PP braided ropes with different braided number

编织绳已达到最大断裂强力,且应变为 20%~120%时,它们的电阻保持恒定值,并稳定在 1 000  $\Omega$  以下;而编织根数为 8 的 CNT/PP 编织绳的断裂伸长较大,其电阻在应变大于 50%后呈非线性增长,直至拉伸强力达到断裂强力,其电阻高达约 5 000  $\Omega$ 。CNT/PP 编织绳的电阻在等应变下呈无规律增长,原因是其断裂伸长未呈现出规律性变化,

及编织后再浸渍时编织绳上的 CNT 分布不匀,导致编织绳的弹性不匀,因此断裂伸长量未表现出明显的变化规律。

对比图 3a)和图 3b)可以看出,涂覆 CNT 的 CNT/PP 编织绳的断裂强力较 PP 编织绳有所降低。断裂伸长量也较 PP 编织绳有所下降,但所有 CNT/PP 编织绳均在伸长量大于 7.5 mm 才开始断裂。因拉伸测试夹距设定为 10 mm,故可得 CNT/PP 编织绳的断裂伸长率大于 75%。Chhetrya 等<sup>[7]</sup>的研究指出,人体最大程度的运动为 160°的膝关节运动,其最大拉伸率为 20%,CNT/PP 编织绳的断裂伸长率完全满足对人体运动的监测要求。

### 2.3 电学性能分析

不同编织根数 CNT 再浸渍后 CNT/PP 编织绳的应变与电阻的关系如图 4 所示。可以看出,编织根数为 7 的 CNT/PP 编织绳的电阻比编织根数为 8 的小,这是 CNT 涂覆不均匀导致的。在 CNT/PP 编织绳的应变达 120%之前,编织根数为 5、6、7 的

归根结底,原因在于 CNT 涂覆不均匀。

不同编织根数 CNT 再浸渍后 CNT/PP 编织绳的长度与电阻的关系如图 5 所示。可以看出,随着测量长度的增加,CNT/PP 编织绳的电阻逐渐增大。测量的 CNT/PP 编织绳电阻相当于单位长度(cm)的电阻串联在一起,若 CNT 分布均匀,则同样的编织根数下,CNT/PP 编织绳的电阻与测量长度呈线

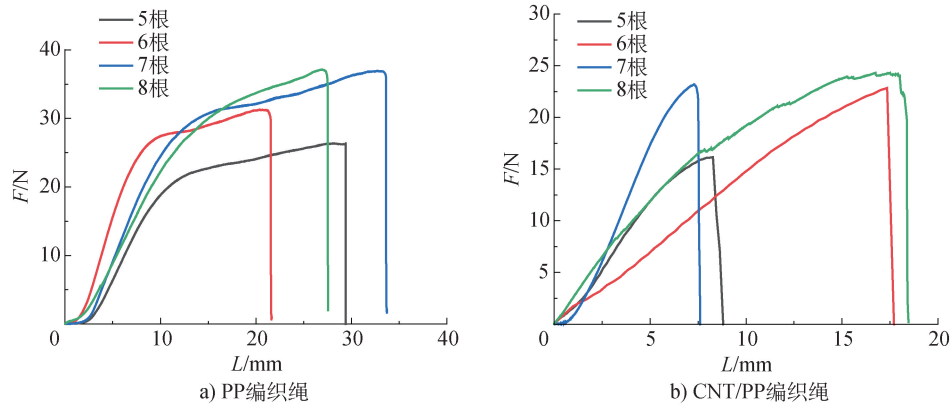


图 3 不同编织根数编织绳的的力学性能

Fig. 3 Mechanical properties of braided ropes with different braided number

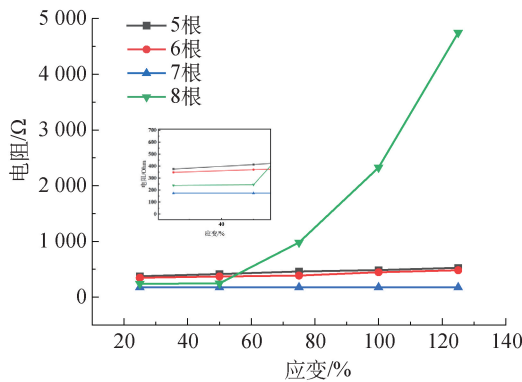


图 4 不同编织根数 CNT/PP 编织绳的应变-电阻图

Fig. 4 Strain-resistance diagrams of CNT/PP braided ropes with different braided number

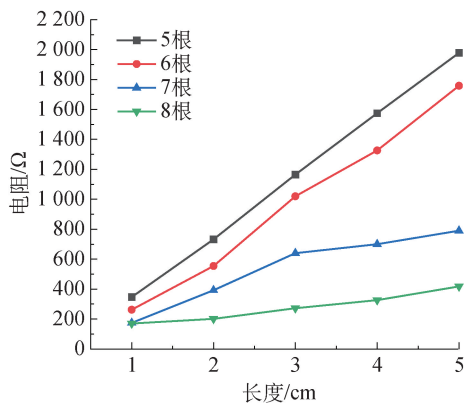


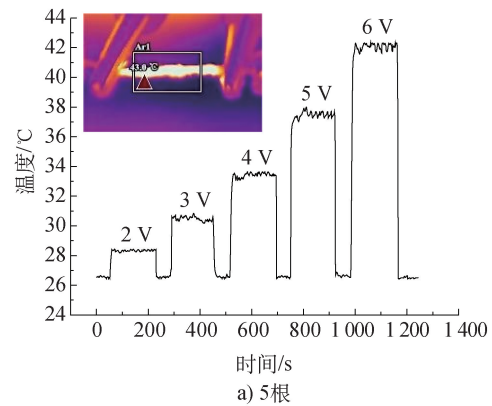
图 5 不同编织根数 CNT/PP 编织绳的长度-电阻图

Fig. 5 Length-resistance diagrams of CNT/PP braided ropes with different braided number

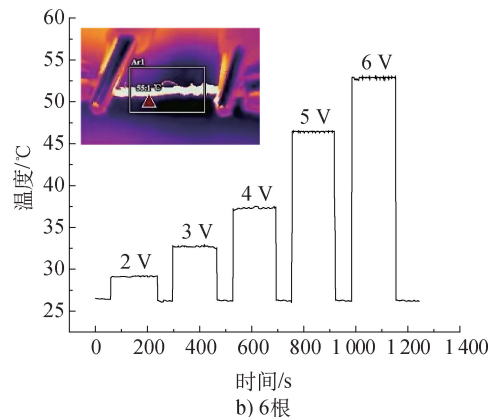
性关系,但 CNT/PP 编织绳上的 CNT 分布不均匀,导致同一编织根数下,电阻值随着测试长度呈非线性增加。不过电阻变化的总体趋势是随着测试长度增加而升高。

## 2.4 电热性能分析

不同编织根数 CNT 再浸渍后 CNT/PP 编织绳的电热图如图 6 所示。可以看出,随着通入电压的增大,CNT/PP 编织绳的温度随之升高。同一编织根数下,通入的电压越大,电流就越大,产生的热量越多,CNT/PP 编织绳的温度就越高;同一通入电压下,编织根数越多,CNT/PP 编织绳上涂覆的 CNT 越多,编织绳的电阻越小,电流就越大,产生的热量越多,因此 CNT/PP 编织绳的温度就越高,电热性能越好。



a) 5根



b) 6根

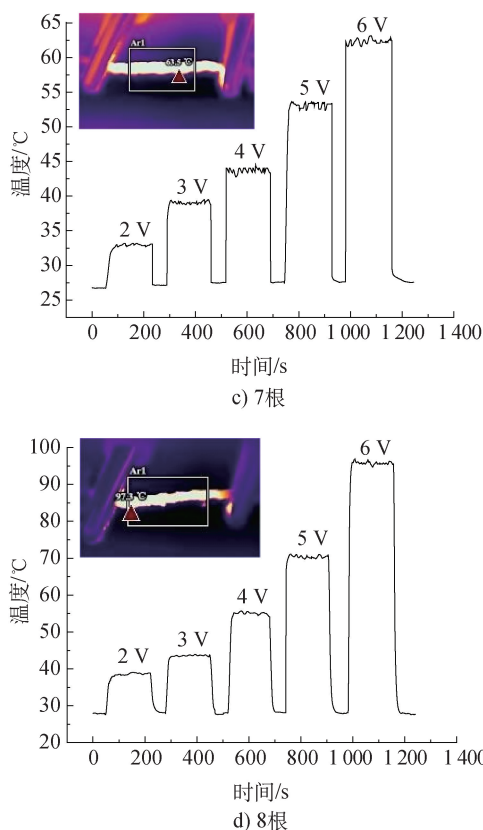


图 6 不同编织根数 CNT/PP 编织绳的电热图  
Fig. 6 Electric heating graphs of CNT/PP braided ropes with different braided number

### 3 结论

相比于不导电的 PP 编织绳, CNT/PP 编织绳的电阻明显减小, 且会产生电热效应。随着编织根数的增加, CNT/PP 编织绳的断裂强力增大, 电阻减小, 电热性能提高。但 CNT 涂覆后, CNT/PP 编织绳的断裂强力和断裂伸长量较原始的 PP 编织绳均有所下降。不过, 涂覆 CNT 后的编织绳仍能保持 75% 以上的断裂伸长率, 能够满足人体运动的监测要求。

### 参 考 文 献

- [1] 苏永刚, 赵茜. 智能纺织品视角下的现代服装设计[J]. 毛纺科技, 2020, 48(11): 102-106.
- [2] 王婷. 智能纺织品的功能性设计与性能评估[J]. 化纤与纺织技术, 2023, 52(9): 176-178.
- [3] 沈琦, 韩玲, 马万启, 等. 智能纤维与纺织品的技术进展[J]. 棉纺织技术, 2022, 50(增刊 1): 70-76.
- [4] 吴昆杰, 张永毅, 勇振中, 等. 碳纳米管纤维的连续制备及高性能化[J]. 物理化学学报, 2022, 38(9): 80-104.
- [5] 王英明. 鞘-芯碳纳米管复合纤维人工肌肉的制备及其电热驱动性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
- [6] 张雨晴, 姚明远, 尹思一, 等. 碳纳米管涂层氨纶传感材料的性能研究[J/OL]. 棉纺织技术: 1-8[2024-03-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1132.TS.20231212.1007.002.html>.
- [7] CHHETRY A, SHARIFUZZAMANM, YOON H, et al. MoS<sub>2</sub>-decorated laser-induced graphene for a highly sensitive, hysteresis-free, and reliable piezoresistive strain sensor[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(25):

## 欢迎订阅《天津纺织科技》

《天津纺织科技》于 1962 年创刊, 是由国家新闻出版广电总局批准设立的纺织科技综合性学术期刊。2017 年在天津纺织控股集团深化改革、整合内部优势资源的调整中, 改由全国针织科技信息中心负责出版运营, 并全新改版为双月刊。依托天纺标检测认证股份有限公司的优势资源, 《天津纺织科技》将服装设计、服装工程、标准检测列为重要学科方向, 以提升服装设计水平, 增强标准检测能力, 推动服装行业品牌建设。

《天津纺织科技》现已收录于中国学术期刊(网络版)、《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊、CNKI 系列数据库、万方数据、维普资讯网全文数据库等, 在国内外具有广泛的影响力。

《天津纺织科技》主要栏目包括服装设计、服装工程、标准检测、纺织材料、纺织工程、印染工程、综述等。它是阐述学术观点的平台、跟踪技术热点的窗口, 在加强学术信息交流, 推广行业技术创新, 促进我国纺织工业发展等方面起着重要作用, 在行业内具有广泛的学术影响力。

《天津纺织科技》为双月刊, 国内外公开发行, 国内统一刊号 CN 12-1110/TS, 邮发代号 6-307, 国内定价 16 元/期, 全年 6 期共

计 96 元(含邮费)。读者可在当地邮政局订阅, 亦可向编辑部直接订阅。

电话: 022-60365364(稿件查询)

022-60365363(合作与订阅)

022-60365362(信息中心)

传真: 022-60116367

E-mail: tjfzkjbjb@126.com

投稿平台: www.bigtextilepub.com

购书网店: <http://zhenzhishuwu.taobao.com>

地址: 天津市空港经济区东九道 6 号(300308)



《天津纺织科技》投稿平台



购书微店