

文章编号: 1671-0444 (2018)05-0689-09

PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的制备及其性能

陈文翀, 胡文, 张弘楠, 覃小红, 张坤

(东华大学 纺织学院, 上海 201620)

摘要: 采用两步法制备聚丙烯腈(PAN)/聚苯胺(PANI)复合纳米纤维纱线,即先通过改良的静电纺丝装置制备 PAN 纳米纤维纱线,再通过气相原位聚合法制备 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线。利用扫描电子显微镜(SEM)、傅里叶红外光谱仪(FTIR)、数字万用表等仪器对复合纳米纤维纱线进行测试表征,讨论了氧化剂浓度、聚合时间、盐酸浓度、聚合温度等因素对其表面形态、电学性能及力学性能的影响。结果表明,在氧化剂浓度为 0.375 mol/L、聚合时间为 5 h、盐酸浓度为 1 mol/L、聚合温度为 20 °C 的条件下,复合纳米纤维纱线具有优良的导电性能及力学性能,电导率最大可达(3.15±0.19) S/m,此时拉伸强度达到(30.30±5.66) MPa。

关键词: 静电纺丝;聚丙烯腈/聚苯胺复合纳米纤维纱线;气相聚合;电导率;拉伸强度

中图分类号: TQ 342⁺.31

文献标志码: A

Preparation and Properties of PAN/PANI Composite Nanofiber Yarns

CHEN Wenchong, HU Wen, ZHANG Hongnan, QIN Xiaohong, ZHANG Kun

(College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Polyacrylonitrile / polyaniline(PAN/PANI) composite nanofiber yarns were prepared by two-step method. PAN nanofiber yarns were first prepared by an improved electrospinning setup. PAN/PANI composite yarns were then prepared by vapor phase in-situ polymerization method. The effects of oxidant concentration, polymerization time, hydrochloric acid concentration and polymerization temperature on the surface morphology, electrical properties and mechanical properties of composite nanofiber yarns were investigated by scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and digital multimeter. The results show that the composite nanofiber yarn has excellent conductivity when the conditions are as follows: oxidant concentration is 0.375 mol/L, polymerization time is 5 h, hydrochloric acid concentration is 1 mol/L and polymerization temperature is 20 °C. The electrical conductivity of composite nanofiber yarns is up to the maximum value (3.15±0.19) S/m and tensile strength of composite nanofiber yarns can reach (30.30±5.66) MPa.

Key words: electrospinning; polyacrylonitrile/polyaniline composite nanofiber yarns; vapor phase polymerization; conductivity ; tensile strength

收稿日期: 2017-05-23

基金项目: 长江学者(青年学者)计划资助项目(51373033);国家自然科学基金资助项目(11172064);教育部重点支持资助项目(113027A);上海市科委“扬帆计划”资助项目(14Y1405100);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目;东华大学励志计划资助项目

作者简介: 陈文翀(1992—),男,上海人,硕士研究生,研究方向为静电纺丝,E-mail: chenwenchong1992@163.com

张弘楠(联系人),男,讲师,E-mail: hnzhang@dhu.edu.cn

智能纺织品^[1-2]是指将智能技术与服装融为一体的高科技产品,其核心是具有特定性能的智能纺织材料。目前应用最广泛的智能纺织品是一维智能材料即导电纤维纱线。由于传统导电纱线的线密度较大,在用于集成度较高的心电监控、通信装备等领域时,其较大的厚度和质量降低了服装的实用便携性,也严重制约了这类智能服装向轻质化方向的发展。静电纺丝^[3-4]是当前一种常用的微纳米纤维的纺制方法。相较于传统纳米纤维膜,静电纺纳米纤维纱线因具有力学性能好以及纱线内纤维取向高等特点而被广泛研究。东华大学覃小红课题组^[5]自主研发了可连续制备取向纳米纱线的设备,该装置可连续纺纱4 h以上,其纺纱速度可以调控,能够基本满足实验室需求^[5-6]。纳米纤维纱线具有比表面积大、细度小,质量轻等特点,用其制备的导电纳米纱线已被应用于超级电容器电极材料^[7-8]及气敏传感器^[9]中。

目前导电纤维纱线的制备方法^[10]主要有碳或金属加入法、导电聚合物纺丝或后处理法以及导电物质涂层法等,其中,导电聚合物后处理法因其工艺简单,制成的纤维纱线导电性能好、包覆程度可调等特点而被广泛使用。导电聚合物中,聚苯胺(PANI)因合成简单、单体成本低、电活性高成为目前导电高分子材料研究的焦点。PANI的合成方法^[11-13]主要是化学合成法,包括电化学合成法和传统化学合成法等。化学合成法是指在酸性条件下,通过硫酸铵(APS)、三氯化铁(FeCl_3)等氧化剂将苯胺氧化聚合。聚合方式分为界面聚合、乳液聚合、原位聚合等。原位聚合法^[14]是制备PANI最广泛的方法之一,可分为液相聚合和化学气相聚合法。现阶段研究者通常使用液相聚合法^[15-17],其操作步骤虽然简单,但存在反应时间较长、聚合速度过快、基体表面聚苯胺团聚等缺点,使得电导率最高仅为1 S/m左右^[16];而化学气相聚合法^[18-19]能降低反应速率,得到的聚苯胺在基体表面分布较均匀、表面结构疏松、比表面积较大,有助于形成连续的导电通道,提高复合纱线的导电性能。

聚丙烯腈(PAN)^[20-21]由于价格低廉、化学稳定性好、制备的纳米纤维粗细均匀而成为静电纺丝中应用最广泛的高聚物之一。本文使用两步法制备PAN/PANI复合纳米纤维纱线:首先利用改进的静电纺丝装置^[5-6]制备取向PAN纳米纤维纱线,再

通过化学气相聚合法制备PAN/PANI复合纱线。采用单因素试验法,分别讨论了氧化剂浓度、聚合时间、盐酸浓度、聚合温度等因素对复合纳米纤维纱线表面形态、电学性能及力学性能的影响。

1 试验部分

1.1 试验设备与试验材料

YB 302型电子天平,03-2型恒温磁力搅拌器,EST 804A型电子高压发生器,LSP 01-1A型注射泵,GMSX-101型纳米纤维纱线机,TM-3000型扫描电子显微镜(SEM),傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)(美国Varian公司),XQ-2型纤维强度仪,UNI-T型新型数字万用表。

PAN粉末,平均相对分子质量为75 000,上海金山石化有限公司;N-N二甲基甲酰胺(DMF),分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司;APS、苯胺(ANI)、盐酸,分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 试验方案

采用单因素试验法,探究氧化剂浓度、聚合时间、盐酸浓度、聚合温度等因素对PAN/PANI复合纳米纤维纱线形貌结构、电学性能和力学性能的影响。

1.3 PAN/PANI复合纳米纤维纱线制备

1.3.1 纺丝溶液的配制

根据前期的预试验,在使用质量分数为12%的PAN-DMF溶液进行纺纱时,出丝量较多,成纱三角锥较为稳定。因此本试验选择质量分数为12%的PAN-DMF溶液作为纺丝液。称取一定质量的PAN粉末和DMF置于烧杯中,在常温下磁力搅拌8 h,使PAN粉末溶解在DMF溶液中。

1.3.2 PAN纳米纤维纱线的制备

采用笔者课题组自主研发的静电纺纱装置^[5-6]制备PAN纳米纤维纱线。使用5 mL的注射器抽取一定量的PAN溶液,用内径为0.5 mm的针头,与高压发生器的正极和负极相连。两针头间的距离为15 cm,纺丝电压为 ± 9 kV左右,纺丝液流量为0.8 mL/h,金属盘和导纱杆间的距离为8 cm,金属盘转速为200 r/min。在电场力作用下,由针头喷出PAN纳米纤维,在金属圆盘和导纱杆的作用下,引导纳米纤维取向,并通过圆盘的转动对取向纳米纤维束进行加捻,形成取向PAN纳米纤维纱线。

1.3.3 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的制备

PAN/PANI 复合纳米纤维纱线制备流程如图 1 所示。根据 1.2 节中的试验方案,将 PAN 纳米纤维纱线浸泡在不同浓度的 APS 溶液中 2 h,取出后在烘箱中烘干。利用自制的气相聚合装置,将一定量的苯胺盐酸混合溶液置于装置底部,将烘干后

的纳米纤维纱线置于反应容器中,使用循环式真空泵将容器抽成真空状态,将容器置于设定温度下的密闭环境中反应数小时。待反应结束后,将 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线取出,用去离子水和无水乙醇反复冲洗,并在 50 °C 真空烘箱中干燥 12 h 后取出。



图 1 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线制备流程图

Fig. 1 Flow chart of preparation of PAN/PANI composite nanofiber yarns

1.4 测试仪器及测试方法

采用 SEM 观察 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的表观形态;采用 FTIR 对复合纳米纤维纱线进行测试,分辨率为 4 cm^{-1} ,扫描范围为 $500\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 。观察合成后的复合纳米纤维纱线中官能团的变化,从而验证在 PAN 纳米纤维纱线表面已经合成聚苯胺。使用数字万用表测试并计算 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的导电性能;采用纤维强度仪,测试以不同参数制备的 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的拉伸断裂强度及断裂伸长率。

2 结果与讨论

2.1 复合纳米纤维纱线形态结构分析

2.1.1 复合纳米纤维纱线红外光谱(FTIR)分析

复合纳米纤维纱线的 FTIR 图谱如图 2 所示,其中,2 934、2 243、1 730 和 1 448 cm^{-1} 处为原 PAN 纳米纤维纱线的特征峰。此外,图谱中还出现了新的特征峰,在 1 580 和 1 480 cm^{-1} 处附近的特征峰分别代表醌环中的 C=C 和苯环中的 C=C 伸缩振动峰,在 1 100 cm^{-1} 处附近为苯环 C-H 的面内弯曲振动特征峰^[22]。由此表明,通过气相化学原位聚合法,成功制备了 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线。另外,由于不同氧化剂浓度下制备的复合纳米纤维纱线出现特征峰的位置基本一致,表明不同氧化剂浓度并未对复合纳米纤维纱线的化学结构产生影响。

2.1.2 不同 APS 浓度制备的复合纳米纤维纱线形态分析

根据前期的预试验及相关文献,在其他参数不

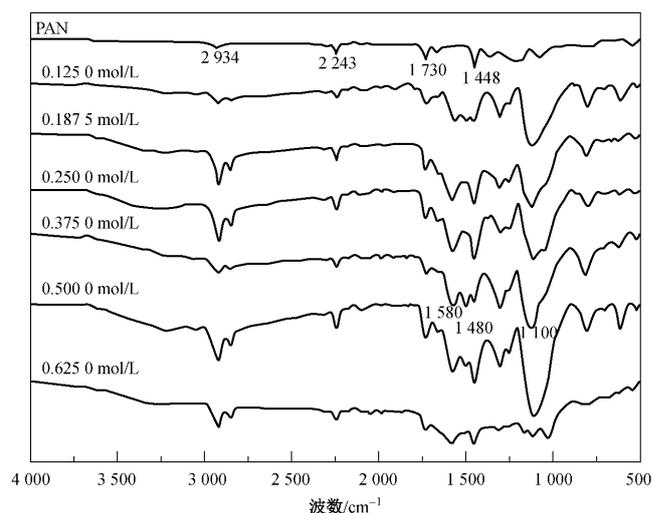


图 2 由不同 APS 浓度制备的 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的 FTIR 图谱

Fig. 2 FTIR spectra of PAN/PANI composite nanofiber yarns prepared by different APS concentration

变(聚合时间为 5 h、盐酸浓度为 1.0 mol/L、聚合温度为 20 °C)的条件下,选择 APS 在去离子水中的浓度分别为 0.125 0、0.187 5、0.250 0、0.375 0、0.500 0 和 0.625 0 mol/L 制备复合纳米纤维纱线。不同 APS 浓度制备的 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的 SEM 图如图 3 所示。

由图 3(a)~3(d)可知,在 APS 浓度较低时,复合纳米纤维纱线表面包覆的聚苯胺较少。随着 APS 浓度的增加,聚苯胺在纱线表面的包覆率逐渐提高,且在 APS 浓度为 0.375 0 mol/L 时(见图 3(g)和 3(h)),复合纳米纤维纱线中的纤维表面均匀地包覆了聚苯胺。随着 APS 浓度的进一步增加(见图 3(i)~3(m)),纱线表面的聚苯胺出现明显的团聚现象。

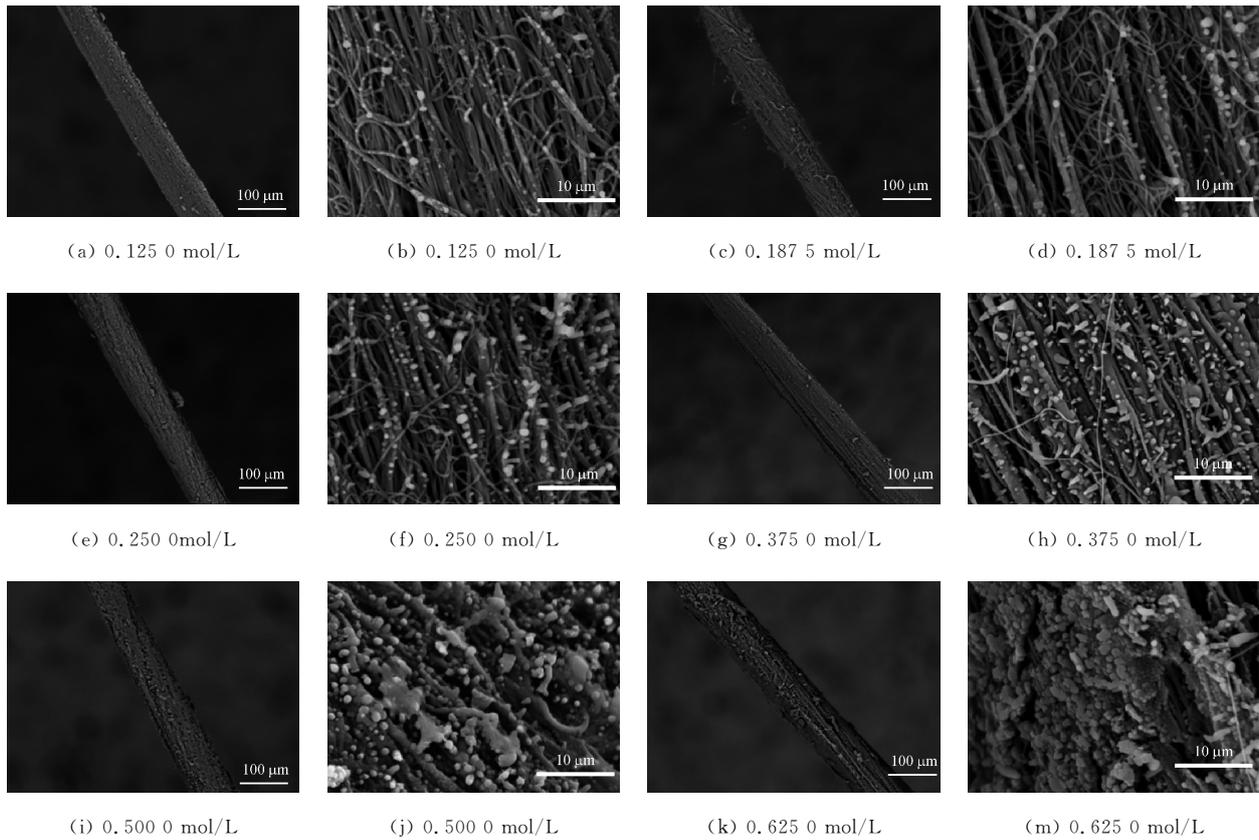


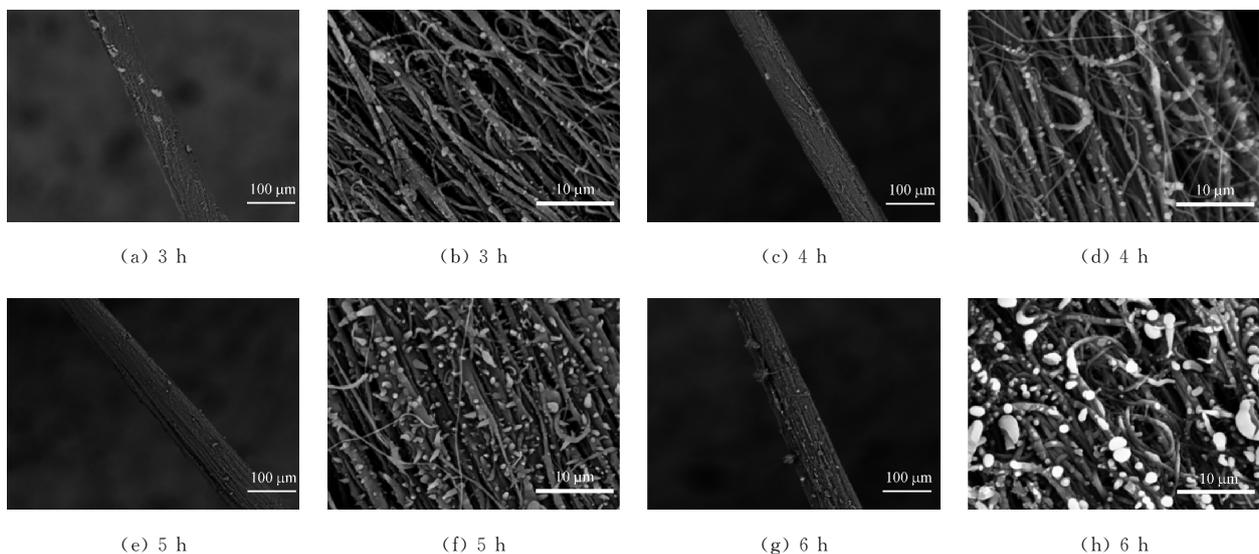
图 3 不同 APS 浓度制备 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的 SEM 图像

Fig. 3 SEM images of PAN/PANI composite nanofiber yarns prepared by different APS concentration

2.1.3 不同聚合时间制备的复合纳米纤维纱线表面形态分析

在前期试验中观察到在 1 h 左右, 纱线表面部分已经从白色转变为绿色(掺杂态的翠绿亚胺结构), 故在其他参数不变(APS 浓度为 0.3750 mol/L、

盐酸浓度为 1.0 mol/L、聚合温度为 20 °C) 的条件下, 选择聚合反应的时间分别为 3、4、5、6 和 12 h 制备复合纳米纤维纱线。不同聚合时间制备的 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线 SEM 图如图 4 所示。



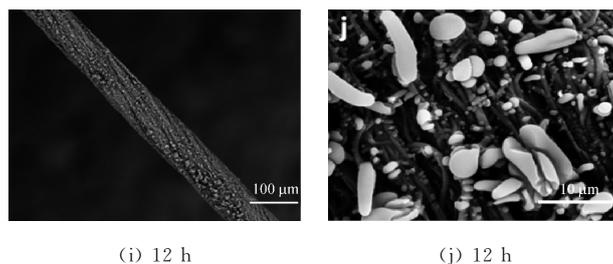


图 4 不同聚合时间制备的 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的 SEM 图像

Fig. 4 SEM images of PAN/PANI composite nanofiber yarns prepared by different polymerization time

由图 4(a)~4(d)可知,在聚合时间较短时,复合纳米纤维纱线表面包覆的聚苯胺较少,聚苯胺颗粒尺寸较小。随着时间的增加,聚苯胺在纱线表面的包覆率逐渐提高,当聚合时间为 5 h 时(见图 4(e)和 4(f)),复合纳米纱线中的纤维表面均匀地包覆了聚苯胺。但继续延长聚合时间(见图 4(g)~4(j)),纱线表面的聚苯胺颗粒的尺寸明显增大。

2.1.4 不同盐酸浓度制备复合纳米纤维纱线表面形态分析

根据相关文献,在其他参数不变(APS 浓度为 0.375 0 mol/L、聚合时间为 5 h、聚合温度为 20 °C)的条件下,选择盐酸浓度分别为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 mol/L 制备复合纳米纤维纱线。不同盐酸浓度制备的 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的 SEM 图如图 5 所示。

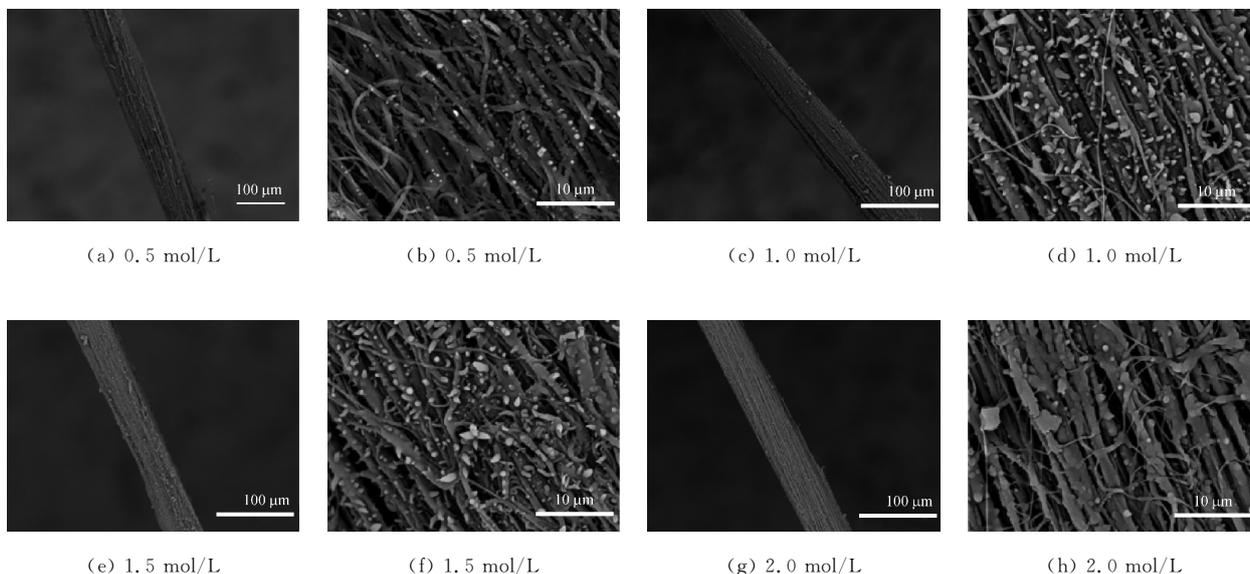


图 5 不同盐酸浓度制备的 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的 SEM 图像

Fig. 5 SEM images of PAN/PANI composite nanofiber yarns prepared by different HCl concentrations

由图 5(a)和 5(b)可知,在盐酸浓度较低时,生成聚苯胺量较少。当盐酸浓度为 1.0 和 1.5 mol/L 时(见图 5(c)~5(f)),复合纳米纤维纱线中的纤维表面均匀地包覆了聚苯胺,且没有出现明显的团聚现象;但继续增加盐酸浓度(见图 5(g)和 5(h)),纱线表面的聚苯胺量有所减少且部分纤维出现粘连。

2.1.5 不同聚合温度制备复合纳米纤维纱线表面形态分析

在其他参数不变(APS 浓度为 0.375 0 mol/L、聚合时间为 5 h、盐酸浓度为 1.0 mol/L)的条件下,选择聚合反应温度分别为 15、18、20 和 25 °C 制备复合纳米纤维纱线。不同聚合反应温度制备的 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的 SEM 图如图 6 所示。

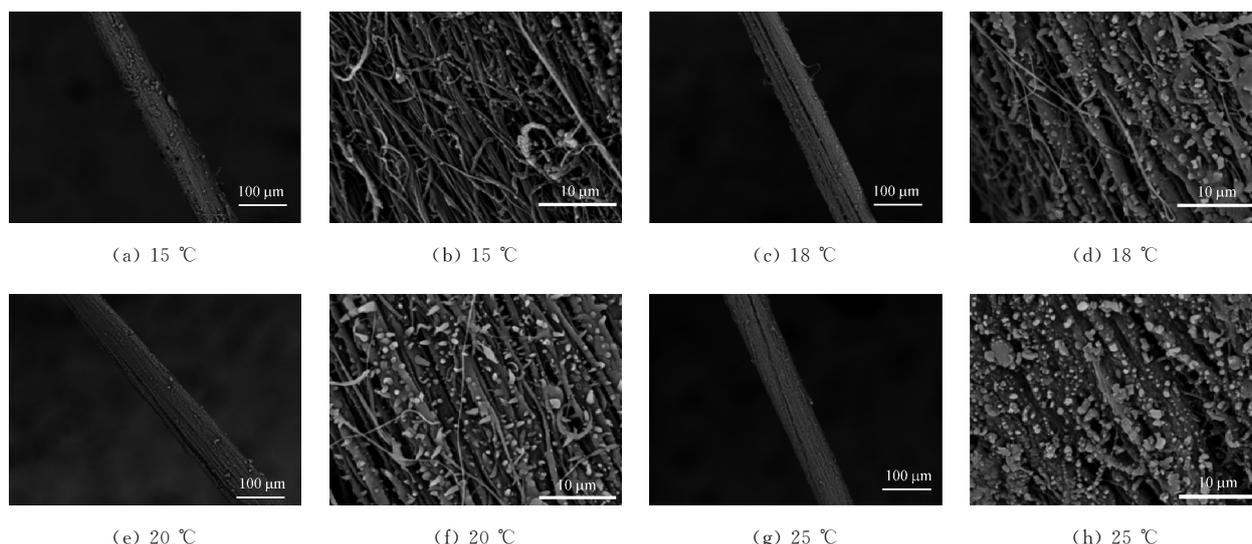


图 6 不同聚合温度制备的 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的 SEM 图像

Fig. 6 SEM images of PAN/PANI composite nanofiber yarns prepared by different polymerization temperature

由图 6(a)和 6(b)可知,在反应温度较低时,纱线表面包覆的聚苯胺较少。随着反应温度的升高(见图 6(c)~6(f)),复合纳米纤维纱线中的纤维表面均匀地包覆了聚苯胺,且没有出现明显的团聚现象;但继续升高温度(见图 6(g)和 6(h)),纱线表面的聚苯胺有所团聚且包覆不均匀。

2.2 复合纳米纤维纱线的导电性能分析

化学原位聚合法制备聚苯胺反应过程包括链的引发、增长、中止 3 个阶段^[23-24]。链的引发是指体系中的苯胺单体被缓慢氧化成阳离子自由基,两个阳离子自由基通过头-尾相连形成苯胺二聚体;二聚体被快速氧化为醌式结构,再直接与苯胺聚合形成三聚体;三聚体分子再按头-尾连接方式继续增长,最终形成聚苯胺分子链。在反应过程中,氧化剂浓度、掺杂酸浓度等因素均会影响生成的聚苯胺的导电性能。

2.2.1 不同 APS 浓度制备复合纳米纤维纱线导电性能分析

不同 APS 浓度制备的复合纳米纤维纱线的导电性能如图 7 所示。由图 7 可知:在 APS 浓度较低时,复合纱线的电导率仅为 (0.55 ± 0.11) 和 (0.62 ± 0.16) S/m;随着 APS 浓度的提高,电导率继续增加,且当 APS 浓度为 0.3750 mol/L 时,电导率达到最大为 (3.15 ± 0.19) S/m;继续提高 APS 浓度,复合纱线电导率呈下降趋势。

提高 APS 浓度^[25],可使纱线表面聚苯胺含量增多,由此可能在表面形成了连续的导电通道(见图 3(g)和 3(h)),复合纱线的电导率提高。此外,

提高 APS 浓度有利于提高聚苯胺的氧化程度,使聚苯胺分子链中氧化单元的比例增加,从而提高电导率;但氧化剂浓度过高,聚合反应速度过快,生成的聚苯胺聚合度降低;过量的氧化剂会使具备导电性的氧化还原中间产物过度氧化^[25],并破坏了聚苯胺导电所需分子链的共轭 π 键结构,使电导率下降。

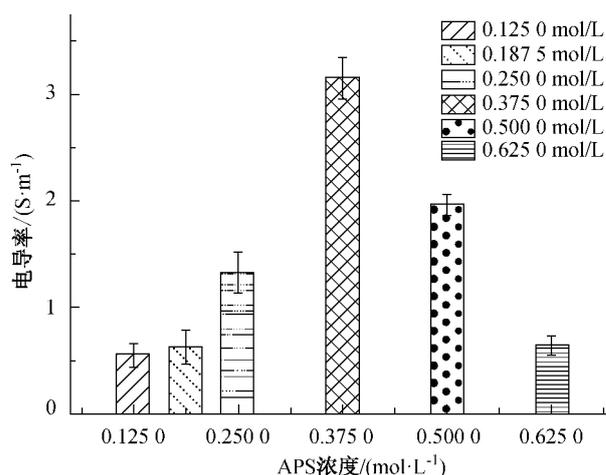


图 7 不同 APS 浓度制备的 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的导电性能

Fig. 7 Electrical conductivity of PAN/PANI composite nanofiber yarns prepared by different APS concentrations

2.2.2 不同聚合时间制备复合纳米纤维纱线导电性能分析

由不同聚合时间制备的复合纳米纤维纱线的导电性能如图 8 所示。

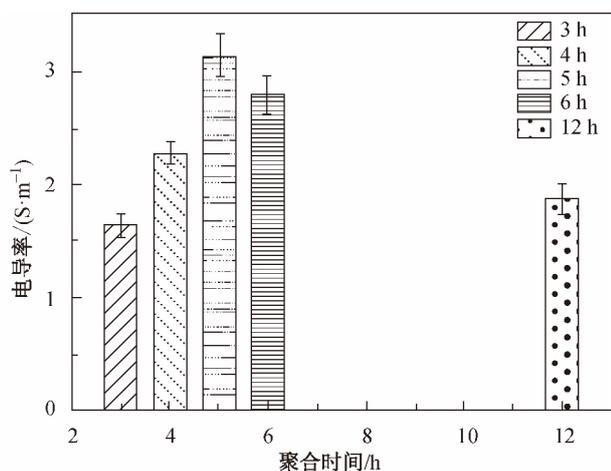


图 8 由不同聚合时间制备的 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的导电性能

Fig. 8 Electrical conductivity of PAN/PANI composite nanofiber yarns prepared by different polymerization time

由图 8 可知,随着反应时间的增加,PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的导电性逐渐增强,且到达一定聚合时间后,复合纱线的电导率达到最大值。化学气相原位聚合是一个逐步聚合的过程,苯胺单体需要一定时间挥发并逐渐在密闭容器中形成苯胺气氛。在化学气相聚合过程中,单体苯胺分子是逐渐扩散并吸附于纳米纤维纱线上的氧化剂活性点并发生聚合的^[19]。在较短时间内,由于单体氛围浓度不够高,只在少数氧化剂活性点发生聚合,且聚合的大多是苯胺的低聚物,聚合反应不完全,导电性较差;随着反应时间的增加,纱线表面包覆了均匀的聚苯胺颗粒(见图 4(e)和 4(f)),体现优良的导电性能;随着反应时间的进一步增加,电导率出现下降。这可能是由于聚合时间过长,苯胺会继续以聚苯胺表面为成核点,继续聚合,即苯胺发生了二次生长^[22],导致聚苯胺颗粒尺寸增加(见图 4(i)和 4(j)),比表面积减小,影响了复合纱线的电导率。

2.2.3 不同盐酸浓度制备复合纳米纤维纱线导电性能分析

由不同盐酸浓度制备的复合纳米纤维纱线的导电性能如图 9 所示。由图 9 可知,随着盐酸浓度的增加,PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的导电性呈先增大后减小的趋势。在聚合过程中,盐酸起到掺杂和催化的作用,当盐酸浓度较低时,反应体系中的 pH 值较大,苯胺被氧化成阳离子自由基的速度减小,聚苯胺分子只能部分被掺杂,体系中聚苯胺含量低,导电性较差;随着酸度增加,生成阳离子自由基速率增大,电导率上升;当盐酸浓度继续增加时,过量的盐酸可能会生成盐酸的加成产物,使得聚苯胺

分子中醌氏结构含量下降,复合纱线电导率下降。

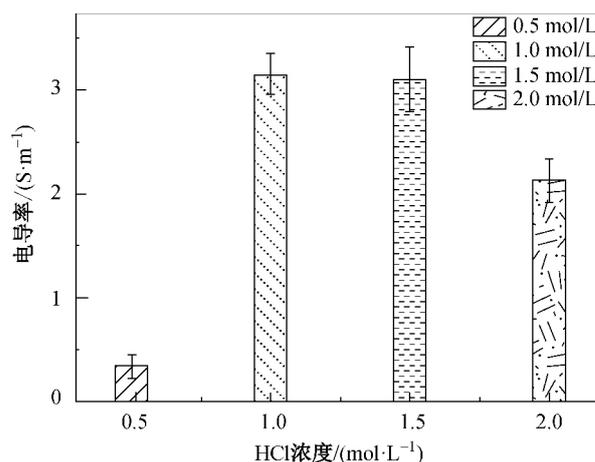


图 9 由不同盐酸浓度制备的复合纳米纤维纱线的导电性能

Fig. 9 Electrical conductivity of PAN/PANI composite nanofiber yarns prepared by different HCl concentration

2.2.4 不同聚合温度制备复合纳米纤维纱线导电性能分析

不同聚合温度制备复合纳米纤维纱线的导电性能如图 10 所示。

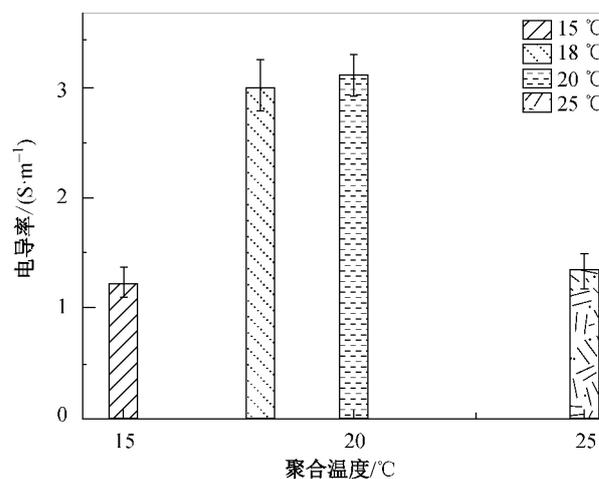


图 10 由不同聚合温度制备 PAN/PANI 的复合纳米纤维纱线的导电性能

Fig. 10 Electrical conductivity of PAN/PANI composite nanofiber yarns prepared by different polymerization temperatures

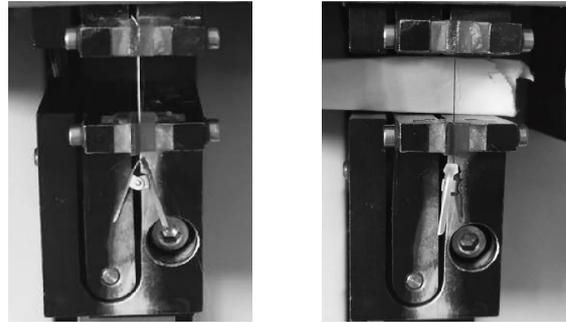
由图 10 可知,随着聚合温度的增加,PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的导电性呈先增大后减小的趋势。由于在气相原位聚合中,苯胺单体需要一定的时间挥发并逐渐在密闭容器中形成苯胺气氛。若温度太低,分子扩散运动较慢,形成苯胺气氛的时间较长,在一定时间内形成聚苯胺的量较少,导电性较差。随着温度的增加,聚合反应的诱导期缩短,有利于生成“头尾”有序结构,纱线表面均匀包覆聚苯胺(如图 6(c)~

6(f));但反应温度进一步升高,由于苯胺聚合反应是放热反应,过高的温度不但会影响生成“头-尾”相连的苯胺二聚体,高温的过氧化作用也会不断加强,使聚苯胺氧化断链,复合纱线的电导率下降。

2.3 复合纳米纤维纱线力学性能分析

导电复合纳米纤维纱线的力学性能在智能纺织材料的应用中也是一项重要的性能。纯 PAN 纳米纤维纱线与 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的力学性能测试如图 11 所示,由不同参数制备的复合纳米纤维纱线的力学性能结果如图 12 所示。从图 11 和 12 中可知,PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的拉伸断裂强度相较于纯 PAN 纳米纤维纱线有了明显的提高。这是由于聚苯胺包覆在 PAN 纤维表面或填充在纳米纤维之间,增大了纳米纤维间的摩擦力和抱合力^[26],使复合纱线的拉伸强度增加。同时可看出,复合纱线的断裂伸长率相较于纯 PAN 纳米纤维纱线有所减小,这是由于聚苯胺分子链的刚性结构^[27],使得复合纱线的柔性下降。但在各项参数(氧化剂浓度、聚合时间、盐酸浓度)达到其最大设计值后,复合纳米纤维纱线

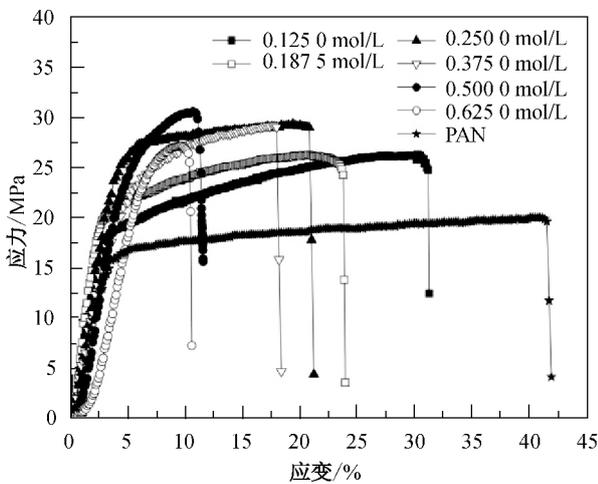
拉伸断裂强度有所下降。这可能是由于氧化剂浓度过高,使得聚苯胺分子链断裂;酸度过高而增加了盐酸加成产物,这些生成的低聚物在用乙醇及去离子水后处理时被除去,导致拉伸断裂强度降低。



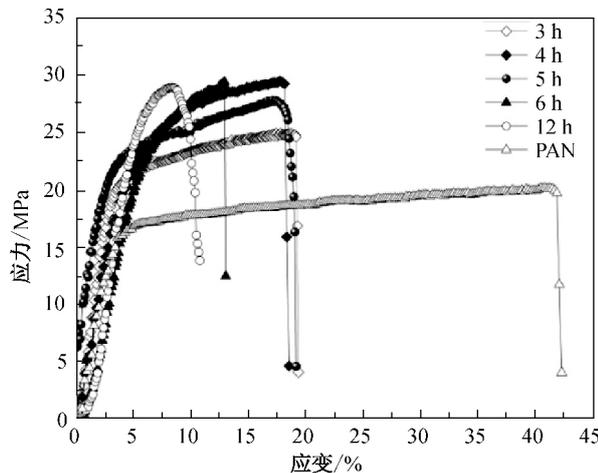
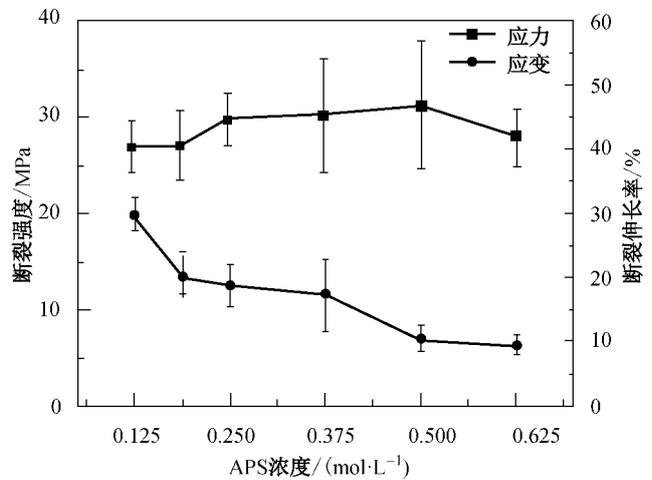
a) 纯 PAN 纳米纤维纱线 (b) PAN/PANI 复合纳米纤维纱线

图 11 纯 PAN 纳米纤维纱线与 PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的力学性能测试

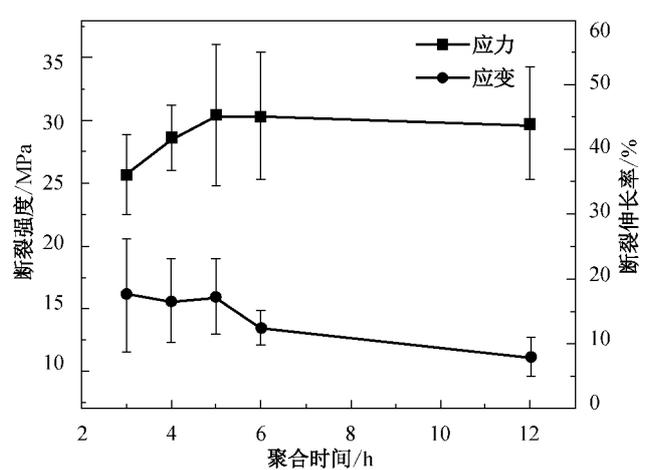
Fig. 11 Test of mechanical properties of pure PAN nanofiber yarns and PAN/PANI composite nanofiber yarns



(a) APS 浓度



(b) 聚合时间



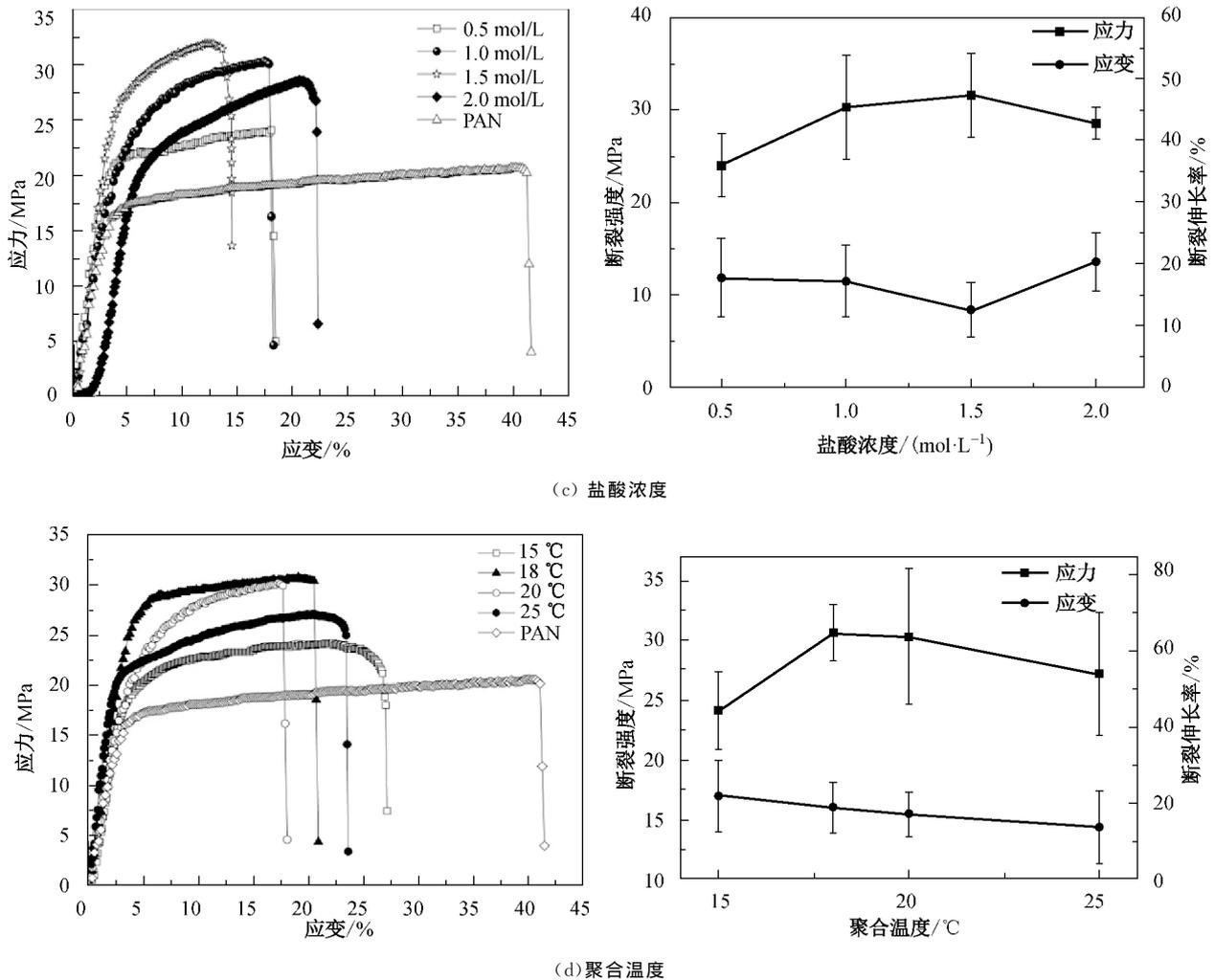


图 12 由不同参数制备的复合纳米纤维纱线的力学性能

Fig. 12 Mechanical properties of PAN/PANI composite nanofiber yarns prepared from different parameters

3 结 语

本文采用静电纺纱技术与气相原位聚合相结合的方法,成功制备了 PAN/PANI 复合导电纳米纤维纱线,分别探究了氧化剂浓度、聚合时间、盐酸浓度、聚合温度对于复合纳米纤维表纱线面形态、电学性能、力学性能的影响。研究表明,氧化剂浓度为 $0.375\ 0\ \text{mol/L}$ 、聚合时间为 $5\ \text{h}$ 、盐酸浓度为 $1.0\ \text{mol/L}$ 、聚合温度为 $20\ ^\circ\text{C}$ 时, PAN/PANI 复合纳米纤维纱线的表面形貌及电学性能较好,聚苯胺颗粒均匀地包覆在 PAN 纱线表面,且复合纱线的电导率最高可达 $(3.15 \pm 0.19)\ \text{S/m}$,同时由于聚苯胺的包覆,复合纱线的拉伸断裂强度明显增加,最高达到 $(30.30 \pm 5.66)\ \text{MPa}$ 。

参 考 文 献

[1] 丁长坤,程博闻,任元林,等. 导电纤维的发展现状及应用前景[J]. 纺织科学研究, 2006(3): 32-39.

- [2] 李雯. 用于智能纺织品的聚苯胺/氨纶复合导电纤维的制备[D]. 上海: 东华大学纺织学院, 2004.
- [3] BHARDWAJ N, KUNDU S C. Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique[J]. Biotechnology Advances, 2010, 28(3): 325-347.
- [4] HUANG Z M, ZHANG Y Z, KOTAKI M, et al. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites[J]. Composites Science & Technology, 2003, 63(15): 2223-2253.
- [5] 吴韶华,张彩丹,覃小红,等. 静电纺取向纳米纤维束及纳米纤维纱线的研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(6): 182-186.
- [6] WU S H, QIN X H. Uniaxially aligned polyacrylonitrile nanofiber yarns prepared by a novel modified electrospinning method[J]. Materials Letters, 2013, 106(9): 204-207.
- [7] JIA K, ZHUANG X, CHENG B, et al. Solution blown aligned carbon nanofiber yarn as supercapacitor electrode[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2013, 24(12): 4769-4773.

(下转第 712 页)

参 考 文 献

- [1] 姚穆. 纺织面料的发展趋势与新材料技术的应用[J]. 棉纺织技术, 2002, 30(3): 5-10.
- [2] 滕启跃. 服装创新的典范——轻羽绒服[J]. 中国纤检, 2015, 11(4): 32-36.
- [3] 祝丽娟, 许益, 鲍群群, 等. 2008年度纺织产品开发现状分析[C]//2009中国纺织产品开发报告: 春夏版. 2009: 12-15.
- [4] 李策. 纸张生产实用技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998: 437-454.
- [5] 施楣梧, 裘越华, 张燕, 等. 纺织品视觉遮蔽性能的研究[J]. 纺织科学研究, 2008, 5(1): 182-186.
- [6] 陈丽芬, 杨海军, 施楣梧, 等. 面料防透效果的测试方法: CN102061606A[P]. 2010-12-06.
- [7] 陈丽芬, 王妮, 王惠珍, 等. 一种防透视性羊毛精纺面料及其生产方法: CN102002793A[P]. 2011-04-06.
- [8] 刘晓松. 异形纤维与织物遮光性的研究[D]. 上海: 东华大学纺织学院, 2010.
- [9] 张娜. 防透明织物制备及表征关键技术研究[D]. 上海: 东华大学纺织学院, 2011.
- [10] HU C Y, NIU M H. On the suitability of desktop scanners for assessing print-through[J]. World Pulp and Paper, 2009, 8(5): 12-21.
- [11] YANAGIHARA M, NAKAJIMA T. Composite false-twisted yarn excellent in transparency preventing property and method for producing the same: JP 2007-239146[P]. 2006-03-09.
- [12] 王小兰. 新型防紫外窗纱的结构设计及性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学纺织科学工程学院, 2016.
- [13] 孙一凯. 具有防透视功能细旦聚酯纤维的制备与性能研究[D]. 上海: 东华大学材料科学与工程学院, 2015.
- [14] FURUSHIMA T. Study on transparency of thin fabrics[J]. Journal of the Japan Research Association for Textile End-Uses, 1985, 6(7): 291-294.
- [15] 王妮, 施楣梧, 俞建勇. 防透明聚酯纤维的结构与性能研究[J]. 国际纺织导报, 2013, 7(1): 22-26.
- [16] SHAMS N A. Evaluating textile fabric color variation by scanner[J]. Research Journal of Textile and Apparel, 2007, 8(4): 31-39.
- [17] ABBAS H, ALI S, NATERI A, et al. Estimation of fabric opacity by scanner[J]. Sensor Review, 2014, 34(4): 404-409.
- (责任编辑: 郭小敏)
-
- (上接第 697 页)
- [8] WANG K, MENG Q, ZHANG Y, et al. High-performance two-ply yarn supercapacitors based on carbon nanotubes and polyaniline nanowire arrays[J]. Advanced Materials, 2013, 25(10): 1494-8.
- [9] LIU P H, WU S H, ZHANG Y, et al. A fast response ammonia sensor based on coaxial PPy-PAN nanofiber yarn [J]. Nanomaterials, 2016, 6(7): 121.
- [10] 施楣梧, 南燕. 有机导电纤维的结构和性能研究[J]. 毛纺科技, 2001(1): 5-8.
- [11] WANG X, SCHREUDER-GIBSON H, DOWNEY M, et al. Conductive fibers from enzymatically synthesized polyaniline [J]. Synthetic Metals, 1999, 107(2): 117-121.
- [12] TANG Z, LIU S, WANG Z, et al. Electrochemical synthesis of polyaniline nanoparticles [J]. Electrochemistry Communications, 2000, 2(1): 32-35.
- [13] 王宏智, 李香, 胡伟明, 等. 电化学合成聚苯胺的研究概况[J]. 电镀与精饰, 2009, 31(7): 12-15.
- [14] HU L, TU J, JIAO S, et al. In situ electrochemical polymerization of a nanorod-PANI-Graphene composite in a reverse micelle electrolyte and its application in a supercapacitor [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2012, 14(45): 15652.
- [15] 潘玮, 赵金安. 聚苯胺/聚丙烯腈导电纤维的结构与性能[J]. 纺织学报, 2006, 27(10): 32-34.
- [16] 洪剑寒, 潘志娟. PTT/W/PANI 导电纱的制备及其抗静电性能[J]. 印染, 2013, 39(19): 12-15.
- [17] 张保宏, 薛涛, 孟家光. 聚苯胺基涤纶复合导电纱线的制备及表征[J]. 西安工程大学学报, 2013, 27(2): 140-143.
- [18] CHO J, SHIN K H, JANG J. Polyaniline micropattern onto flexible substrate by vapor deposition polymerization-mediated inkjet printing[J]. Thin Solid Films, 2010, 518(18): 5066-5070.
- [19] 张鲁宁. 化学气相聚合制备导电聚合物复合纳米材料[D]. 成都: 电子科技大学光电信息学院, 2014.
- [20] 覃小红, 王新威, 胡祖明, 等. 静电纺丝聚丙烯腈纳米纤维工艺参数与纤维直径关系的研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2005, 31(6): 16-22.
- [21] 张竞, 何伟, 马腾, 等. 静电纺丝 PAN 纳米纤维的制备与表征[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2011, 25(4): 342-345.
- [22] 李文君. 聚苯胺包覆电纺纳米碳纤维的制备及其超级电容性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学材料学院, 2012.
- [23] WEI Y, HSUEH K F, JANG G W. Monitoring the chemical polymerization of aniline by open-circuit-potential measurements[J]. Polymer, 1994, 35(16): 3572-3575.
- [24] 郑剑锋, 赵江红, 朱珍平. 掺杂酸和氧化剂的浓度对聚苯胺纳米线导电性的影响[J]. 材料导报, 2009, 23(6): 17-20.
- [25] 徐浩, 延卫, 冯江涛. 聚苯胺的合成与聚合机理研究进展[J]. 化工进展, 2008, 27(10): 1561-1568.
- [26] 洪剑寒, 潘志娟, 张小英, 等. 应用原位聚合的 PTT/毛/聚苯胺复合导电纱制备与性能[J]. 纺织学报, 2014, 35(10): 30-35.
- [27] 赵建宝. 聚苯胺/环氧形状记忆复合材料的制备及性能研究[D]. 镇江: 江苏大学机械工程学院, 2016.
- (责任编辑: 杜佳)