

DOI: 10.13475/j.fzxb.20180306307

# 聚丙烯腈/聚砒酰胺复合纳米纱线的制备与表征

靳世鑫<sup>1</sup>, 刘书华<sup>2</sup>, 刘岩<sup>3</sup>, 郑元生<sup>1</sup>, 辛斌杰<sup>1</sup>

(1. 上海工程技术大学 服装学院, 上海 201620; 2. 上海工程技术大学 科研处, 上海 201620;

3. 上海工程技术大学 化学化工学院, 上海 201620)

**摘要** 针对聚丙烯腈(PAN)耐热性能较差、聚砒酰胺(PSA)阻燃但染色性能较差等问题,在保持纺丝液质量分数、纺丝接收距离等条件不变的前提下,利用自制旋转式动态静电纺纱机,分别采用不同纺丝电压和不同接收器转速制备一系列聚丙烯腈/聚砒酰胺复合纳米纱线。借助扫描电子显微镜、单纱强力机、毛细管效应测定仪、傅里叶变换红外光谱仪和热重分析仪对复合纳米纱线的结构和性能进行表征。结果表明:纺丝电压和接收器转速对纳米纱线的形态影响比较明显,并进一步影响纱线的力学性能;当纺丝电压为25 kV、接收器转速为40 r/min时,纱线具有较好的外观形貌、力学性能和热性能;当接收器转速为60 r/min,纺丝电压为30 kV时,纳米纱线的芯吸性能最好。

**关键词** 聚丙烯腈; 聚砒酰胺; 静电纺丝; 纳米纱线

中图分类号: TQ 342.79 文献标志码: A

## Preparation and characterization of polyacrylonitrile/polysulfonamide composite nanoyarns

JIN Shixin<sup>1</sup>, LIU Shuhua<sup>2</sup>, LIU Yan<sup>3</sup>, ZHENG Yuansheng<sup>1</sup>, XIN Binjie<sup>1</sup>

(1. School of Fashion Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Research Department, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract** Aiming at the poor heat resistance of polyacrylonitrile (PAN), excellent heat resistance and poor dyeing property of polysulfone amide (PSA), a series of nanoyarns were prepared at different spinning voltages and collector rotating speeds by using a self-made dynamic electrospinning machine, with the concentration of spinning solution and the receiving distance kept constant. The structure and properties of the composite nanoyarns were studied by using scanning electron microscope, single yarn strength tester, capillary effect tester, Fourier transform infrared spectrometer and thermogravimetric analyzer. The experimental results show that the morphology of nanoyarns are significantly affected by spinning voltages and the collector rotating speeds. In addition, the mechanical properties of nanoyarns are also affected. It is found that the nanoyarns could achieve a better performance in morphology, strength and heat resistance at spinning voltage of 25 kV and collector rotating speed of 40 r/min. The nanoyarns show a better wicking performance at collector rotating speed of 60 r/min and spinning voltage of 30 kV.

**Keywords** polyacrylonitrile; polysulfonamide; electrospinning; nanoyarn

静电纺丝技术作为制备纳米纤维材料最直接的方法之一,受到越来越多的关注<sup>[1-2]</sup>。由于纳米纤

维具有优异的性能,在过滤<sup>[3-4]</sup>、催化<sup>[5]</sup>、防护<sup>[6]</sup>、传感器<sup>[7-8]</sup>、能源<sup>[9-10]</sup>等众多领域得到了广泛应用。

收稿日期: 2018-03-26 修回日期: 2018-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(11702169); 上海工程技术大学人才计划(E3-05071703046)

第一作者: 靳世鑫(1991—),男,硕士生。主要研究方向为功能性静电纺纳米纤维制备。

通信作者: 刘岩(1973—),女,助理研究员,硕士。主要研究方向为功能高分子材料开发与应用。E-mail: liuaynxin@hotmail.com。

众所周知,静电纺丝形成产品的主要形式是纤维网,纤维网的低力学性能限制了其应用。为扩大纳米纤维的使用领域,可将纳米纤维通过一定的方式组装成纳米纤维束和纳米纤维纱线。

目前已有许多通过静电纺丝法制备纳米纤维纱线的研究报道。根据纳米纤维纱线成型工艺,一般分为直接法<sup>[11-12]</sup>和间接法<sup>[13]</sup>。通过这些方法制备的纳米纤维纱线的力学性能与纤维网相比有了明显的提高。研究发现,通过改变接收装置、卷绕装置的速度,对纤维进行后处理或者改变聚合物的溶剂体系都可调控纳米纤维纱线的力学性能<sup>[14-16]</sup>。

聚丙烯腈(PAN)纤维是一种耐气候性较好的纤维,但是其对热敏感,耐酸碱性较差,属于易燃纤维<sup>[17]</sup>。聚砜酰胺(PSA)作为一种高性能材料,具有许多优异性能,如耐热性、阻燃性等,可用于开发防护用品、航空航天材料<sup>[18-19]</sup>。虽然 PSA 具有很多优异的性能,但是其纤维的染色性能、抗紫外线性能和抗静电性能较差。将 PAN 与 PSA 复合可提高 PAN 的阻燃性能,同时改善复合纱线的染色性能和抗紫外线性能,延长复合纳米纱线的使用寿命,扩大其应用范围。本文利用自制的旋转式动态静电纺纱机,以 PAN 与 PSA 作为原材料制备连续的复合纳米纱线,探索纺丝电压和接收器转速对纱线成型的影响,并测试复合纳米纱线的表面形态、力学性能、芯吸性能、化学结构和热性能,以期制备出兼具 2 种聚合物优异性能的复合材料。

## 1 实验部分

### 1.1 材料与仪器

聚丙烯腈(PAN)粉末,平均相对分子质量为 9 万,美国 Sigma-Aldrich 有限公司;聚砜酰胺原液(PSA 聚合度 $\geq 396$ ,平均相对分子质量为 15 万~20 万,质量分数为 12.5%),上海特氨纶纤维有限公司;N,N-二甲基乙酰胺(DMAc,相对分子质量为 87.12)、N,N-二甲基甲酰胺(DMF,相对分子质量为 73.10),分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

LE104E/02 型电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;IKN I25 型高剪切分散机,上海依肯机械设备有限公司;NDJ-1 型旋转粘度计,上海天平仪器厂;JP-303B 型超声波脱泡装置,深圳市洁盟清洗设备有限公司;RES-001 型旋转式动态静电纺纱机,实验室自制;SU8010 型场发射扫描电子显微镜,日本日立公司;XS(08)XH 型电子单纱强力机,上海旭赛仪器有限公司;YG871 型毛细管效应测定仪,上海精密仪器仪表有限公司;Spectrum Two 傅里

叶变换红外光谱仪、TGA4000 型热重分析仪,铂金埃尔默仪器上海有限公司。

### 1.2 纺丝液的配制

在 PSA 原液中加入适量的 DMAc,制备 PSA 质量分数为 12%的纺丝液,利用高剪切分散机搅拌 1 h 混合均匀,然后超声波脱泡处理 1 h,得到均一的 PSA 溶液。

称取一定的 PAN 粉末与适量 DMF 混合,制备 PAN 质量分数为 12%的溶液,于 70 °C 恒温水浴中利用超高速搅拌机搅拌 2 h,然后超声波脱泡处理 1 h 得到均一的 PAN 溶液。以上所有实验均在温度为 20 °C,相对湿度为 40%~60%的条件下进行。

利用旋转粘度计分别测试 PAN 和 PSA 纺丝液的黏度。量取 100 mL 纺丝液置于烧杯中,选择相应的转子进行测试,测试温度为 20 °C,相对湿度为 40%,测得 PAN 的黏度为 10 Pa·s,PSA 的黏度为 27 Pa·s。可以看出,质量分数相同的 2 种纺丝液,PSA 的黏度远大于 PAN 的黏度,这是由于 PSA 和 PAN 的分子质量差别较大造成的。

### 1.3 复合纳米纱线的制备

在本文实验中,利用旋转式动态静电纺纱机进行双喷头多针头对称静电纺纱时,由于质量分数为 12%的 PAN 和 PSA 纺丝液黏度差异较大,它们的适纺电压差别较大:以 PAN 适纺电压纺丝时,对于 PSA 来说电压过低,无法正常出丝,射流多以液滴的形式出现;以 PSA 适纺电压纺丝时,对于 PAN 来说纺丝电压过高,射流发生明显偏转且极不稳定,纤维无法收集到接收装置上。通过多次实验发现,采用单针头纺丝时上述现象会相对缓解,2 种纺丝液可顺利进行纺丝,纳米纤维也可被顺利收集到接收装置上。

本文实验使用如图 1 所示的旋转式动态静电纺纱机,采用对称的单针头喷丝头装置(喷丝头外径为 0.8 mm,内径为 0.5 mm,长度为 25.4 mm)进行静电纺丝。2 个喷丝头与高压电源相连,对称分布于距离接收装置为 200 mm 的位置,2 种纺丝液分别经注射泵从 2 个不同的注射器中挤出,挤出速度为 0.5 mL/h,施加于喷丝头上的电压分别为 20、25 和 30 kV,接收器作为负极接地即可得到 PAN/PSA 复合纳米纱线。采用相同方法在 2 个针头中同时加入 PAN 或 PSA 溶液,即可制得纯 PAN 或 PSA 纳米纱线。

在喷丝头处施加高压静电后,位于喷丝头处的纺丝液受电场力拉伸形成带电射流。射流在电场中进一步被拉伸成纳米纤维,并迅速转移到接收器上。由电动机驱动的漏斗形接收器作为负极用于收集纳

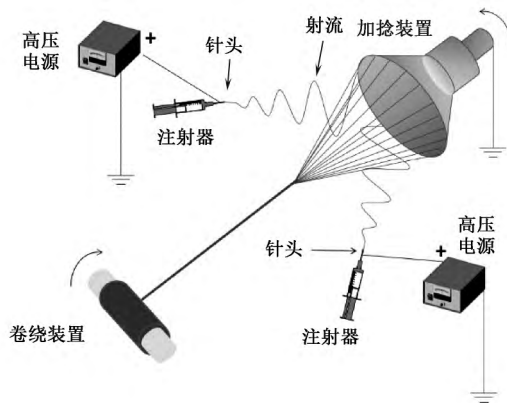


图1 旋转式动态静电纺纱机

Fig.1 Schematic of dynamic rotating electrospinning machine

米纤维,旋转的接收器将纳米纤维加捻从而形成纤维束。在接收器旋转的同时,纳米纤维不断转移到已形成的纳米纤维束上,纳米纤维束逐渐加捻形成稳定的纱线,然后制得的纱线通过卷绕装置卷绕成筒。实验过程中,接收器的转速分别设置为20、40、60 r/min。

## 1.4 复合纳米纱线的性能表征

### 1.4.1 形貌观察

利用场发射扫描电子显微镜观察纱线的表面形态,实验前首先对样品表面进行镀金处理,厚度约为5 nm。

### 1.4.2 力学性能测试

采用电子单纱强力机对纱线的力学性能进行测试,每个样品测试10次,取平均值。

### 1.4.3 芯吸性能测试

采用毛细管效应测定仪对纱线的芯吸性能进行测试,张力夹质量为1 g。

### 1.4.4 化学结构表征

通过傅里叶变换红外光谱仪测试纱线的化学结构,扫描范围为 $5\ 000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ ,分辨率为 $4\text{ cm}^{-1}$ 。

### 1.4.5 纱线热性能测试

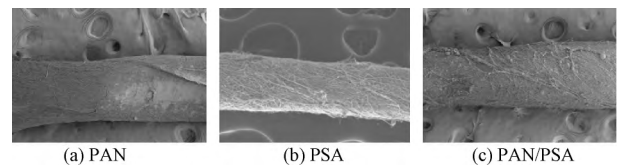
利用热重分析仪对纱线的热性能进行测试。测试样品质量约为8 mg,加热温度范围为 $30\sim 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,升温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,以氮气为保护气体,流速为 $20\text{ mL}/\text{min}$ 。

## 2 结果与讨论

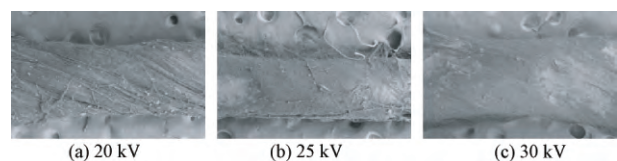
### 2.1 纳米纱线形貌分析

图2为3种不同成分纱线的扫描电镜照片。可以看出,相同纺丝条件下制备的3种纱线在形貌上没有本质性的区别,纱线直径的大小相差不大。

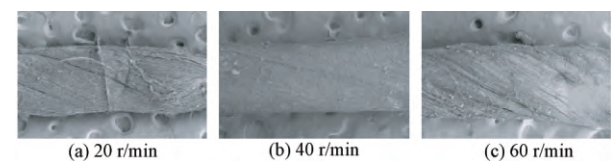
在接收器转速为40 r/min,纺丝电压为20、25

图2 不同成分纱线的扫描电镜照片( $\times 70$ )Fig.2 SEM images of nanoyarns prepared from different materials ( $\times 70$ )

和30 kV条件下制备得到PAN/PSA复合纳米纱线,其扫描电镜照片如图3所示。可以看出,随着电压的升高,纱线表面串珠的数量逐渐减少。这是因为随着电压的升高,电场强度增加,射流受到的牵伸增大,使纱线表面串珠的数量减少,纤维的排列也更加规整。

图3 不同电压下制备的纳米纱线的扫描电镜照片( $\times 70$ )Fig.3 SEM images of nanoyarns prepared at different voltages ( $\times 70$ )

在纺丝电压为25 kV,接收器转速分别为20、40和60 r/min条件下制备得到PAN/PSA复合纳米纱线,其扫描电镜照片如图4所示。纱线表面纤维的捻回角分别为 $19^{\circ}$ 、 $25^{\circ}$ 和 $33^{\circ}$ 。随着接收器转速的增大,纤维的排列取向度提高,使捻回角增大。

图4 不同转速下制备的纳米纱线的扫描电镜照片( $\times 70$ )Fig.4 SEM images of nanoyarns prepared at different rotating speeds ( $\times 70$ )

由扫描电镜照片可知,在纺丝电压为30 kV,接收器转速为40 r/min时,制得的PAN/PSA复合纳米纱线形貌较好。

### 2.2 纳米纱线力学性能分析

图5示出电压设定为25 kV,接收器转速为40 r/min时,不同组分的纳米纱线的拉伸曲线。可以看出: PAN的断裂强度最大,为 $44.96\text{ cN}/\text{tex}$ ; PAN/PSA混纺纱次之; PSA最小,为 $29.58\text{ cN}/\text{tex}$ 。与PAN进行静电纺纱混纺后,PAN/PSA复合纳米纱线的断裂强度得到明显提升,增至 $35.29\text{ cN}/\text{tex}$ ;断裂伸长也明显减小,由 $2.10\text{ mm}$ 减小到 $1.58\text{ mm}$ 。

图6示出接收器转速为40 r/min时,不同纺丝

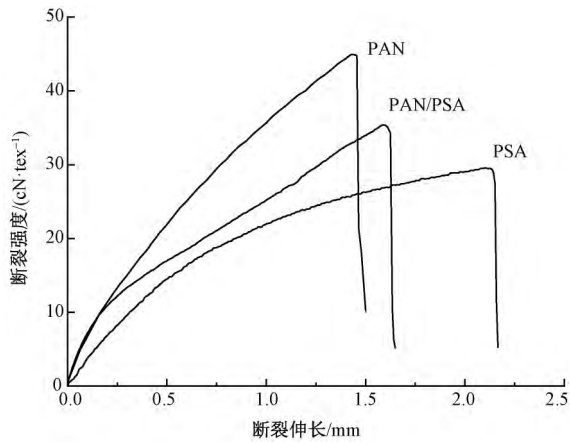


图 5 不同成分纳米纱线的拉伸曲线图  
Fig.5 Tensile curves of nanoyarns prepared from different materials

电压下制备的 PAN/PSA 纳米纱线的拉伸曲线。电压的不同会造成组成纱线纤维直径的不同,高电压具有较大的电场力,可将形成射流后的纳米纤维牵伸得更加彻底,使纤维大分子排列更加有序,进而提升纳米纤维的结晶区比例,进一步影响纱线的断裂强度。由图 6 可以看出:在纺丝电压为 20 kV 时,纱线断裂强度为 30.16 cN/tex;在电压升高至 25 kV 时,纱线断裂强度较大,为 35.28 cN/tex;电压继续升高至 30 kV 时,纱线断裂强度略微减小至 34.34 cN/tex,与纺丝电压为 25 kV 时相比变化不大,但断裂伸长较电压为 25 kV 时略大。

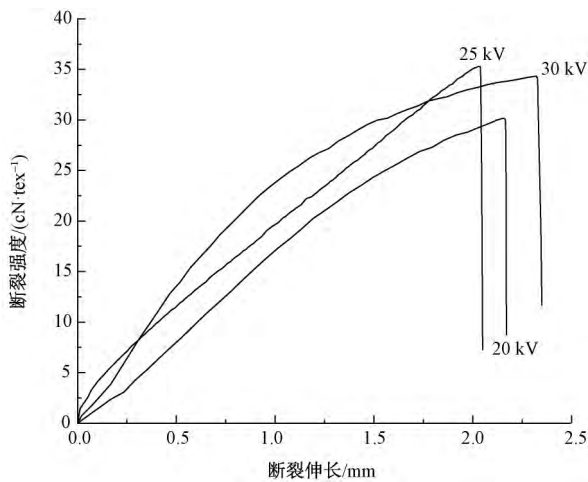


图 6 不同电压下纳米纱线的拉伸曲线图  
Fig.6 Tensile curves of nanoyarns prepared at different voltages

图 7 示出纺丝电压保持 25 kV,在不同接收器转速条件下制备的 PAN/PSA 复合纳米纱线的拉伸曲线。接收器转速主要是影响纱线单位长度上的捻回数,捻回数的多少在一定程度上影响纱线的力学性能。从图 7 可以看出:当接收器转速增大时,

PAN/PSA 纳米纱线的断裂强度先增大后减小,在转速为 40 r/min 时增至最大 35.38 cN/tex;且接收器转速较低时,纱线的断裂伸长较大,随着转速的增大,断裂伸长明显减小,由 2.54 mm 减小至 1.59 mm 左右。捻度的增大使纱线中纤维应力沿纱线方向的分量减小,使得在接收器转速为 60 r/min 时制备的纱线的断裂强度和断裂伸长同时减小。

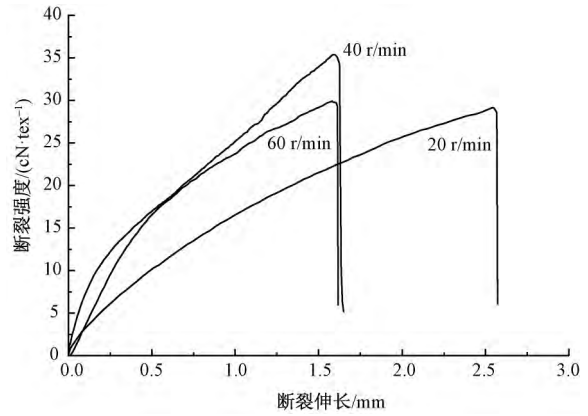
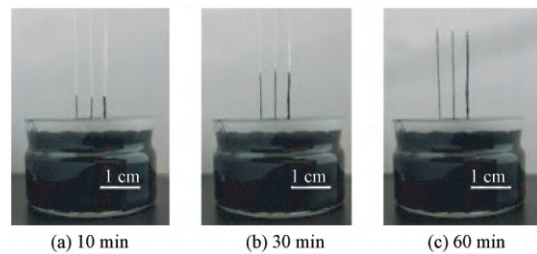


图 7 不同转速下纳米纱线的拉伸曲线图  
Fig.7 Tensile curves of nanoyarns prepared at different rotating speeds

从拉伸曲线图可以看出,在纺丝电压为 25 kV,接收器转速为 40 r/min 时,制得的 PAN/PSA 复合纳米纱线的力学性能最好。

### 2.3 纳米纱线芯吸性能分析

图 8 示出不同组分纳米纱线的芯吸高度。可以看出,3 种材料的纳米纱线在不同芯吸时间下的芯吸高度基本一致,说明材料种类对于纳米复合纱线芯吸高度没有明显影响。



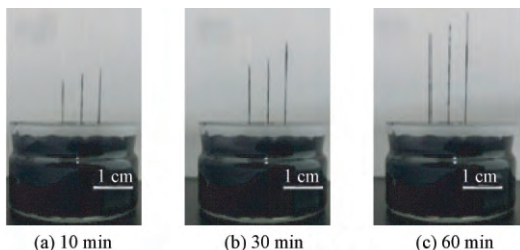
注:每个图中自左向右分别为 PAN、PAN/PSA 和 PSA 纱线。

图 8 不同组分纳米纱线的芯吸性能

Fig.8 Wicking height for nanoyarns prepared from different materials

图 9 示出复合纳米纱线的芯吸高度随纺丝电压及时间的变化。可以发现,复合纳米纱线的芯吸高度随着纺丝电压的升高而增加。随着纺丝电压的升高,纳米纤维直径减小,在纺丝液挤出速度一致的情况下,纺丝电压升高时,单位体积纱线中纳米纤维数量增大,纤维的纳米效应更加明显,因此,纱线中的

纳米纤维芯吸高度会越大。

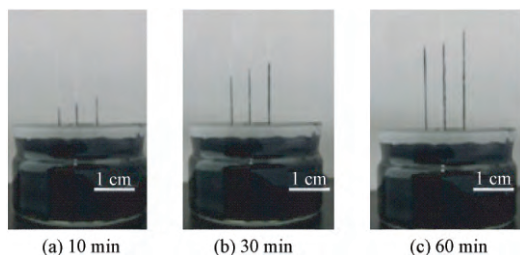


注: 每个图中纺丝电压自左向右分别为 20、25 和 30 kV。

图 9 不同电压下纳米纱线的芯吸高度

Fig.9 Wicking height for nanoyarns prepared at different voltages

图 10 示出纳米纱线的芯吸高度随接收器转速及时间的变化。可以发现, 纳米纱线的芯吸高度随着接收器转速的增加而略有增加。这是因为随着接收器转速的增大, 纳米纱线捻度增大, 纤维的取向性变好, 使得纱线芯吸效应更加明显。



注: 每个图中接收器转速自左向右分别为 20、40 和 60 r/min。

图 10 不同接收器转速下纳米纱线的芯吸高度

Fig.10 Wicking height for nanoyarns prepared at different rotating speeds

通过芯吸图看出, 在纺丝电压为 30 kV, 接收器转速为 60 r/min 时, 制得的 PAN/PSA 复合纳米纱线芯吸性能最好。

## 2.4 纳米纱线化学结构分析

图 11 为不同成分纳米纱线红外光谱图。PAN 红外光谱图中  $1450\text{ cm}^{-1}$  处为 C—H 弯曲振动峰,  $2244\text{ cm}^{-1}$  处为 C≡N 拉伸振动峰,  $2937\text{ cm}^{-1}$  处为 C—H 拉伸振动峰; PSA 红外光谱图中  $3360\text{ cm}^{-1}$  处为 N—H 伸缩振动峰,  $1148\text{ cm}^{-1}$  处为 —SO<sub>2</sub>— 伸缩振动峰,  $1650\text{ cm}^{-1}$  处为 C=O 伸缩振动峰,  $1500$ 、 $1525$  及  $1589\text{ cm}^{-1}$  处为苯环骨架振动峰。对比复合纺纱后得到的纱线的红外光谱图可看出, 复合纱线的红外光谱中具有与纯 PAN 和纯 PSA 对应的官能团峰, 由此可认为所得到的纱线为 PAN/PSA 复合纳米纱线<sup>[20-22]</sup>。

## 2.5 纳米纱线热性能分析

图 12 示出不同成分纳米纱线的 TG 曲线。可以看出: PSA 的热稳定性明显优于 PAN, 质量保留

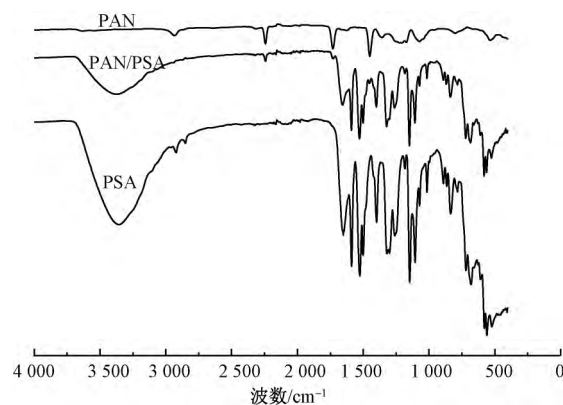


图 11 不同成分纳米纱线的红外光谱图

Fig.11 FT-IR spectra of nanoyarns prepared from different materials

率比 PAN 高 10%; 在 30~150 °C 之间, 3 种纱线都有一定的质量损失, 主要是由样品中的溶剂和水分的散失造成的; 在 150~450 °C 之间, PSA 的质量损失是由于小分子添加剂的分解造成的, 如分散剂等; 当温度升高到 450 °C 时, 大分子链的运动更强烈, 发生断裂(如 —CS—、—CN— 等), 小分子以气体形式释放到空气中, 如 NH<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub>, 这时样品质量损失较大。对于 PAN 来说, 在 150~300 °C 之间由于丙烯腈取代基受热分解使其质量减少, 温度上升至 500 °C 时, 分子链段发生分解, 质量残留进一步减少。对于 PAN/PSA 复合纳米纱线, 其热分解曲线介于上述二者之间, 各分解阶段趋势相似, 质量残留较 PAN 有所增大。

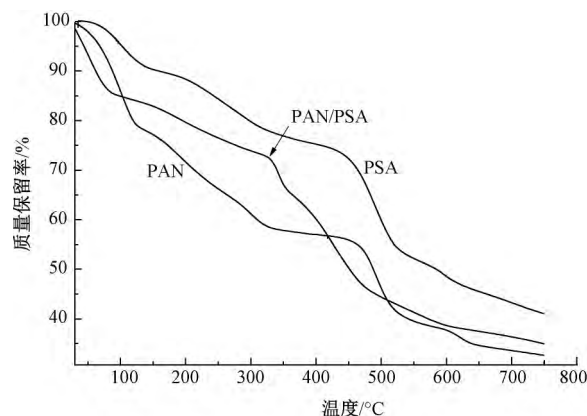


图 12 不同成分纳米纱线的 TG 曲线

Fig.12 TG curves of nanoyarns prepared from different materials

图 13 示出不同纺丝电压下制备的纳米纱线的 TG 曲线。在该条件下, 3 种纱线的热分解趋势基本一致。区别在于随着纺丝电压的增大, 纱线最终残留率随之增大。这是由于纺丝电压高的时候纤维牵伸比较充分, 纤维内部大分子的结晶区比例较高, 使得耐热性能有所提高。

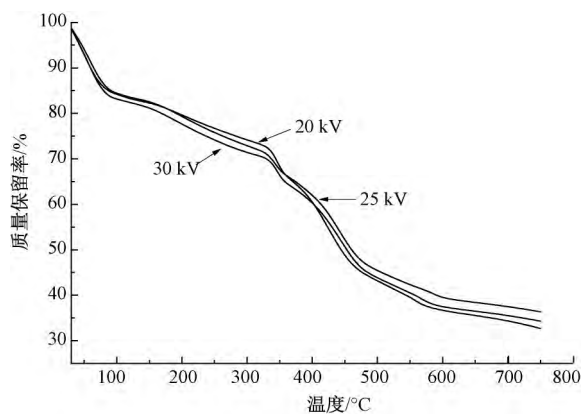


图 13 不同纺丝电压下纳米纱线的 TG 曲线

Fig.13 TG curves of nanoyarns prepared at different voltages

图 14 示出不同接收器转速下制备的纳米纱线的 TG 曲线。在该条件下 3 种纱线的热分解趋势基本一致。随着接收器转速的增大,样品最终的残留略有变化,但不明显。说明在 PAN/PSA 混纺体系中,接收器的转速对纱线的耐热性能影响比较小。

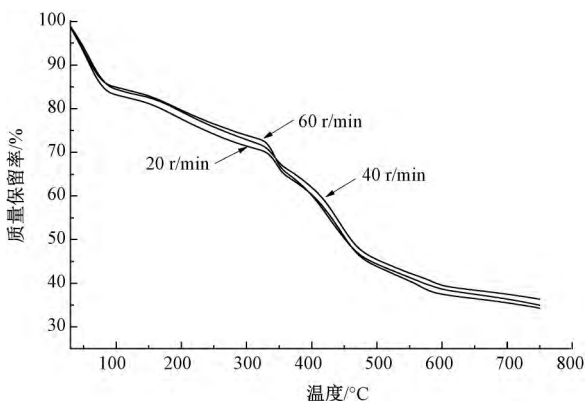


图 14 不同接收器转速下纳米纱线的 TG 曲线

Fig.14 TG curves of nanoyarns prepared at different rotating speeds

对比 TG 曲线图可看出,在纺丝电压为 25 kV,接收器转速为 40 r/min 时,制得的 PAN/PSA 复合纳米纱线耐热性能最好。

### 3 结 论

1) 在相同的纺丝工艺条件下, PAN、PSA 及 PAN/PSA 3 种纱线的纤维结构及芯吸性能无明显差别,但由于高聚物自身的差异,纳米纱线的力学性能和热性能有明显不同。

2) 较高的纺丝电压使射流在纤维成形中受到更大的电场力作用,纤维牵伸更彻底。纺丝电压为 30 kV 时,纱线的形貌、芯吸性能较好;对于纱线的力学性能而言,电压为 25、30 kV 时纳米纱线的断裂强度较好,但是电压为 25 kV 时纱线的断裂伸长更

小;复合纳米纱线在纺丝电压为 25 kV 时耐热性能最好。

3) 不同的接收器转速使纱线具有不同的表面形貌,转速越高,纱线表面的捻回角越大,纤维排列越紧密。接收器转速为 40 r/min 时,纱线的形貌、力学性能及耐热性能较好,纱线在接收器转速为 60 r/min 时表现出最好的芯吸性能。 FZXB

### 参考文献:

- [ 1 ] FONG H , CHUN I , RENEKER D H. Beaded nanofibers formed during electrospinning [ J ]. *Polymer* , 1999 , 40( 16 ) : 4585-4592.
- [ 2 ] RENEKER D H , YARIN A L. Electrospinning jets and polymer nanofibers [ J ]. *Polymer* , 2008 , 49 ( 10 ) : 2387-2425.
- [ 3 ] SHAN H R , WANG X Q , SHI F H , et al. Hierarchical porous structured SiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> nanofibrous membrane with superb flexibility for molecular filtration [ J ]. *ACS Applied Materials Interfaces* , 2017 , 9( 22 ) : 18966-18976.
- [ 4 ] FANG W Y , LIU L B , LI T , et al. Electrospun N-substituted polyurethane membranes with self-healing ability for self-cleaning and oil/water separation [ J ]. *Chemistry: A European Journal* , 2016 , 22( 3 ) : 878-883.
- [ 5 ] ZHANG P , SHAO C , ZHANG Z , et al. In situ assembly of well-dispersed Ag nanoparticles ( AgNPs ) on electrospun carbon nanofibers ( CNFs ) for catalytic reduction of 4-nitrophenol [ J ]. *Nanoscale* , 2011 , 3( 8 ) : 3357-3363.
- [ 6 ] GORJI M , JEDDI A A A , GHAREHAGHAJI A A. Fabrication and characterization of polyurethane electrospun nanofiber membranes for protective clothing applications [ J ]. *Journal of Applied Polymer Science* , 2012 , 125( 5 ) : 4135-4141.
- [ 7 ] WANG X Q , LI Y , LI X Q , et al. Equipment-free chromatic determination of formaldehyde by utilizing parosaniline-functionalized cellulose nanofibrous membranes [ J ]. *Sensors & Actuators B: Chemical* , 2014 , 203: 333-339.
- [ 8 ] SAETIA K , SCHNORR J M , MANNARINO M M , et al. Spray-layer-by-layer carbon nanotube/electrospun fiber electrodes for flexible chemiresistive sensor applications [ J ]. *Advanced Functional Materials* , 2014 , 24( 4 ) : 492-502.
- [ 9 ] IQBAL N , WANG X F , GE J L , et al. Cobalt oxide nanoparticles embedded in flexible carbon nanofibers: attractive material for supercapacitor electrodes and CO<sub>2</sub> adsorption [ J ]. *RSC Advances* , 2016 , 6( 57 ) : 52171-52179.
- [ 10 ] YE W , ZHU J , LIAO X J , et al. Hierarchical three-dimensional micro/nano-architecture of polyaniline nanowires wrapped-on polyimide nanofibers for high

- performance lithium-ion battery separators [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 299(60): 417-424.
- [11] WANG X F, ZHANG K, ZHU M F, et al. Continuous polymer nanofiber yarns prepared by self-bundling electrospinning method [J]. *Polymer*, 2008, 49(11): 2755-2761.
- [12] SHUAKAT M N, LIN T. Highly-twisted, continuous nanofibre yarns prepared by a hybrid needle-needleless electrospinning [J]. *RSC Advances*, 2015, 5(43): 33930-33937.
- [13] WU J L, LIU S, HE L P, et al. Electrospun nanoyarn scaffold and its application in tissue engineering [J]. *Materials Letters*, 2012, 89(24): 146-149.
- [14] ALI U, NIU H, ABBAS A, et al. Online stretching of directly electrospun nanofiber yarns [J]. *RSC Advances*, 2016, 6(36): 30564-30569.
- [15] HE J X, ZHOU Y M, QI K, et al. Continuous twisted nanofiber yarns fabricated by double conjugate electrospinning [J]. *Fibers & Polymers*, 2013, 14(11): 1857-1863.
- [16] LEVITT A S, KNITTED C E, VALLETT R, et al. Investigation of nanoyarn preparation by modified electrospinning setup [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, 134(19): 44813.
- [17] 于伟东. 纺织材料学 [M]. 北京: 中国纺织出版社, 2006: 26.  
YU Weidong. *Textile Materials Science* [M]. Beijing: China Textile & Apparel Press, 2006: 26.
- [18] CHEN Z M, XIN B J, WU X J, et al. Preparation and characterization of PSA/CNT composites and fibres [J]. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2012, 94(5): 21-25.
- [19] XI T, XIN B J. Preparation and characterization of polyester staple yarns nanowrapped with polysulfone amide fibers [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(49): 12303-12312.
- [20] RUHLAND K, FRENZEL R, HORNY R, et al. Investigation of the chemical changes during thermal treatment of polyacrylonitrile and <sup>15</sup>N-labelled polyacrylonitrile by means of in-situ FTIR and <sup>15</sup>N NMR spectroscopy [J]. *Polymer Degradation & Stability*, 2017, 146: 298-316.
- [21] MA Y, ZHOU T, SU G, et al. Understanding the crystallization behavior of polyamide6/polyamide66 alloys from the perspective of hydrogen bonds: projection moving-window 2D correlation FTIR spectroscopy and the enthalpy [J]. *RSC Advances*, 2016, 6(90): 87405-87415.
- [22] BARUAH K, HAZARIKA S, BORTHAKUR S, et al. Preparation and characterization of polysulfone-cyclodextrin composite nanofiltration membrane: solvent effect [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 125(5): 3888-3898.