

# 静电纺丝纳米纤维的应用研究进展

严国荣<sup>1</sup>, 廖喜林<sup>2,3,4</sup>, 刘让同<sup>2,3,4</sup>, 朱方龙<sup>2,3,4</sup>, 胡泽栋<sup>2,3,4</sup>, 耿长军<sup>2,3,4</sup>

(1.宁波汽车零部件检测公司, 浙江 宁波 315104; 2.中原工学院 服装学院, 河南 郑州 450007)

(3.纺织服装河南省协调创新中心, 河南 郑州 450007; 4.河南省功能纺织材料重点实验室, 河南 郑州 450007)

**摘要:** 静电纺丝技术是目前制备纳米纤维的较优方法, 制备的纳米纤维具有比表面积大、直径小、孔隙率高等优点, 在过滤材料、生物医学、电子元件等领域都有着良好的应用前景。综述了近几年来国内外静电纺丝纤维在过滤材料、生物医学、电子元件等领域中的应用研究现状。总结了静电纺丝纳米纤维面临的问题, 并展望了静电纺丝纳米纤维的发展趋势。

**关键词:** 静电纺丝; 纳米纤维; 过滤材料; 生物医学; 电子元件

中图分类号: TQ340.64

文献标识码: A

文章编号: 1001-2044(2018)05-0001-06

DOI:10.16549/j.cnki.issn.1001-2044.2018.05.001

## Advances in application of electrostatic spinning nanofibers

YAN Guorong<sup>1</sup>, LIAO Xilin<sup>2,3,4</sup>, LIU Rangtong<sup>2,3,4</sup>, ZHU Fanglong<sup>2,3,4</sup>, HU Zedong<sup>2,3,4</sup>, GENG Changjun<sup>2,3,4</sup>

(1.Ningbo Automotive Component Testing Co., Ltd., Ningbo 315104)

(2.College of Clothing, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

(3.Collaborative Innovation Center of Textile and Clothing in Henan Province, Zhengzhou 450007)

(4.Henan Province Key Laboratory of Functional Textile Materials, Zhengzhou 450007)

**Abstract:** Electrospinning technology is one of the best methods to prepare nano-fibers at present. The prepared nanofibers have the advantages of large specific surface area, small diameter and high porosity. They have good application prospect in filter materials, biomedicine and electronic components. The application of electrospinning fibers in filtration materials, biomedicine and electronic components in recent years is reviewed. Finally, the problems of electrospinning nanofibers are summarized, and the development trend of electrospinning nanofibers is prospected.

**Key words:** electrostatic spinning; nanofiber; filter material; biomedicine; electronic components

直径在微米或亚微米级的超细纤维被称为纳米纤维, 纳米纤维具有比表面积大、长径比大、孔隙率高、轴向强度高特点, 在很多高附加值领域具有十分重要的应用价值。目前纳米纤维的制备方法主要有拉伸法、微相分离法、模板聚合法、自组装法和静电纺丝法等, 其中静电纺丝法是最具有发展前景的制备方法。静电纺丝法的特点是能够直接、连续地制备纳米纤维, 而且操作简单、适用范围广、生产效率高, 因而被广泛采用<sup>[1]</sup>。静电纺丝法制备的纳米纤维具有孔隙率高、比表面积大、长径比大等优点, 且能制备一些具有特殊功能的异型结构纳米纤维, 如中空纳米纤维、多组分复合纤维等<sup>[2]</sup>。静电纺丝法相比其他的纳米纤维制备方法还具有纤维材料来源广泛的特点, 溶液或者固态的天然聚合物、合成聚合物以及它们的混合物都可以通过静电纺丝法制备纳米纤维。目前静电纺丝法制备的纳米纤维在生物医学、过滤材料、智能电子元件等领域都有广泛的应用, 本文综述了近几年静电纺丝纳

米纤维在以上领域的应用研究进展。

## 1 生物医学

由于静电纺丝纳米纤维具有很好的结构相容性、高表面积、合适的表面理化性质, 已广泛应用于组织工程、药物传递、伤护应用、血管和神经修复等生物医学材料领域<sup>[3]</sup>。

### 1.1 组织工程

组织工程是一项用于修复、维持或者改善受伤组织和器官的新技术, 构成组织工程的三要素为细胞、支架、生长因子, 其中支架为细胞成长提供支持<sup>[4]</sup>。随着组织工程技术的发展, 传统的多孔支架及微米纤维支架越来越难以满足纳米级别的组织工程的需要。与传统的支架相比, 静电纺丝纳米纤维具有三大优势: 首先静电纺丝纳米纤维在尺寸上达到了当今组织工程对组织支架的要求; 其次静电纺丝纳米纤维具有较大的比表面积和高孔隙率, 有利于生长因子、酶等生物分子的吸附以及细胞的附着和铺展, 更有利于在细胞和环境之间进行物质交换; 最后静电纺丝纳米纤维的原材料来源范围广泛, 可用于静电纺丝制造纳米纤维组织工程支架的聚合物多达几十种, 如聚乳酸、聚己内酯、

收稿日期: 2017-12-16

作者简介: 严国荣(1965—), 男, 工程师, 主要从事汽车内饰纤维材料的研究。

通信作者: 刘让同。E-mail: ranton@126.com。

壳聚糖、丝素蛋白等聚合物<sup>[5-6]</sup>。

从人体结构来看,人体内的细胞外基质(ECM)和几乎所有的组织及器官都具有纳米纤维的形式和结构<sup>[3]</sup>。静电纺丝纳米纤维支架在形态结构上与细胞外基质非常相似,可以模拟人体细胞外基质,在针对不同组织生理条件下的个性化应用具有独特的优势。Murphy等人<sup>[7]</sup>针对支架的孔径尺寸对细胞吸附、增殖和迁移的影响进行了研究,结果表明,小孔径支架具有大的表面积,有利于细胞开始阶段的吸附,而大孔径支架有利于细胞的迁移生长和降低细胞的聚集程度。不同器官具有不同特点,需要的支架结构也不一样,比如血管组织工程应用中需要特殊结构的支架。由于人体内血管组织分三层且每一层吸附不同的细胞,因此需制备多层结构的支架。Yuan等人<sup>[8]</sup>利用压力诱导滚卷静电纺丝法制备出三维多层管状结构支架,研究表明细胞在这种三维管状结构的支架中呈现由内到外的三层分布状态,更接近真实的人体血管组织中的不同细胞分布,因此其在血管组织工程支架方面具有极大的应用潜力。

## 1.2 药物控释

药物控释系统是针对一些特殊疾病所研发出来的一种新型药物传递方法,它通过高分子聚合物作为药物载体来控制药物释放速率,使药物在人体内能维持较长时间的治疗浓度来保持血药浓度恒定。与传统的普通胶囊相比,聚合物纳米纤维作为药物传递和控释的载体,具有体积微小,药物稳定性高,可控释延长药物半衰期,易于实现靶向和定位给药提高药物利用率,减少给药次数以减轻或避免药物的毒副作用等优点<sup>[9-10]</sup>。聚合物纳米纤维载药体系可以通过单轴静电纺丝和同轴静电纺丝法制备,前者是将药物和纺丝液均匀混合来制备载药纳米纤维,后者以聚合物为壳材料、以药物为核材料,制备具有核-壳结构的载药纳米纤维<sup>[10]</sup>。

从病理学理论来看,药物和载药的载体尺寸越小,越容易穿过人体组织便于吸收,药物和载体的表面积越大,药物的分解速率就越快。静电纺丝制备的纳米纤维尺寸小、比表面积大,所以其在药物控释系统中具有良好的应用前景。Ratchada等人<sup>[11]</sup>将万古霉素封装于静电纺制备的聚环氧乙烷(PEO)、藻酸钠(SA)和大豆蛋白分离(SPI)混合纳米纤维中,平均直径为200 nm,并将其用于载药控释试验。试验发现,负载万

古霉素的SA/PEO/SPI静电纺丝纤维,在磷酸盐缓冲盐水中浸渍2天后显示初始爆发释放,随后进行控制释放,而且药物负载纤维在培养24 h后还能抑制金黄色葡萄球菌的细菌生长。Kialyongchai等人<sup>[12]</sup>利用同轴静电纺丝技术,制备出药物/醋酸纤维素和明胶混合的核-壳静电纺丝纳米纤维,并进行了人工胃液试验。试验发现,所封装的阿莫西林的释放特性遵循菲克扩散定律,释放半衰期约为5 h,没有观察到突释的现象,且24 h后纤维依然保持完整,证明该纳米纤维可在人体肠胃道内稳定释放药物。

## 1.3 伤口愈合

静电纺丝纳米纤维材料在伤口愈合领域具有得天独厚的优势,与传统材料相比,具有高孔隙率、大表面积纳米纤维可以为人体组织的定植、生长、迁移、物质交换提供绝佳的环境,此外也可以通过微孔结构和覆膜将有害细菌阻隔在外。近年来越来越多的研究将与生物组织有高度相容性,不会产生感染等副作用的纳米纤维作为可降解内敷料的伤护材料,如生物敷料、可降解绷带等<sup>[13-14]</sup>。

Chen等人<sup>[15]</sup>利用骨胶原、壳聚糖、环氧乙烷、乙酸的混合溶液做纺丝液进行静电纺丝,将制备好的纳米纤维在戊二醛蒸气中进行交联,最后将静电纺丝纳米纤维和棉纱布以及胶原蛋白海绵等3种不同材料制成的绷带在老鼠身上进行伤口愈合试验。试验发现,21天后静电纺丝纳米纤维绷带覆盖的伤口面积已经减小到5%以下,并且同时间内纳米纤维材料的愈合效果要好于棉纱布和胶原蛋白海绵。

丝素纳米纤维是近年来被应用于皮肤伤口愈合的一种新型纤维材料,将磺胺嘧啶银添加到丝素中进行静电纺丝,制备的含有磺胺嘧啶银的丝素纳米纤维膜能够更好地促进伤口的修复。在丝素静电纺丝液中添加维生素E制备的新型纳米纤维,试验表明生长于其上的L929细胞能更好地吸附和增殖。为增强丝素纳米纤维的抑菌功能,有研究人员将一种新型多肽Cys-KR12固定于丝素纳米纤维上,合成的新型丝素复合纳米纤维对金黄色葡萄球菌、表皮葡萄球菌、大肠埃希菌、绿脓杆菌等病原菌都有良好的抑制作用<sup>[16-17]</sup>。

## 2 过滤

传统的纤维过滤材料主要是通过经纱与纬纱的孔隙进行过滤,其孔隙率只有30%~40%,且孔隙是直通的,所以诸如机织过滤料、纤维束、针织物过滤料、三向织

物滤料和编织物滤料等纤维过滤材料的过滤效率均不理想。静电纺丝纳米纤维具有高比面积、孔隙率和良好的通透性,且纤维表面黏合性强,吸附力好,具有良好的阻隔性,因此能对直径在  $0.3\ \mu\text{m}$  以下的微粒进行 99.97% 的有效过滤吸附,在纤维过滤材料方面具有广泛的应用前景<sup>[18-19]</sup>。目前静电纺丝纳米纤维大多用于污水和空气的净化与处理,通过吸附其中的各种杂质,尤其是重金属离子和污染物颗粒,从而起到净化水质和空气的作用。

### 2.1 液体过滤

水污染是当今社会水资源日益紧缺的一个重要原因。如今污水排放标准愈加严格,工业废水给人们的生活用水也带来了日益突出的安全问题,这些都促使污水处理得到更广泛的关注和研究。

静电纺丝 PVDF 纳米材料是常用的过滤材料,具有孔径小、孔隙率高、质量轻等优点,而且可以通过表面涂覆、共混等方法对其进行改性,有效提高其亲水性、截留率和抗污染性等性能。X.Li 等人<sup>[20]</sup>通过静电纺制备出  $\text{SiO}_2/\text{PVDF}$  复合纳米纤维,其孔径为  $0.18\sim 1.99\ \mu\text{m}$ ,其纳米纤维膜具有突出的膜蒸馏性能,且结构较为稳定。在直接接触式膜蒸馏盐水淡化试验中发现,当热侧进水为  $60^\circ\text{C}$ 、冷侧循环水为  $20^\circ\text{C}$  时,膜通量可达  $32.5\ \text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。F.E.Ahmed 等人<sup>[21]</sup>将静电纺丝制备的 PVDF-HFP 纳米纤维用超疏油的纤维素离子溶液浸渍,成功制备出纤维素/PVDF-HFP 复合纳米纤维。纤维素增大了纳米纤维的孔隙率、孔径、润湿性和机械性能,使得其在油水分离领域获得了广泛的应用。试验表明,纤维素/PVDF-HFP 复合纳米纤维对汽油、玉米油混合物和马达油的分离率大于 99%,对原油的分离率为 90%。Z.Jiang 等人<sup>[22]</sup>制备了磁性纳米纤维复合垫 PVDF/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /PS,其孔隙率高、机械性能良好、磁性能优异,疏水性好,对油水具有良好的分离能力。

### 2.2 金属离子分离

随着工业的不断发展,重金属离子污染已经成为环境污染的重要方面,而且重金属离子很难被微生物降解,可以在食物链内积蓄,最后进入人体并对身体健康产生严重危害。目前对于工业废水中重金属离子的去除方法主要有化学还原法、化学沉积法、电化学处理法、离子交换法及纳米纤维吸附法等方法。纳米纤维吸附法因具有高效、操作简单、吸附剂种类多等特点而

被广泛使用<sup>[23-24]</sup>。纳米纤维对重金属离子的吸附是一种传质过程,重金属离子通过物理作用或化学反应从液相转移到纤维膜上,吸附机理见图 1<sup>[25]</sup>。

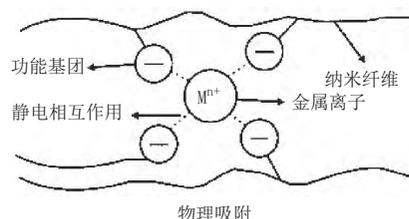


图 1 纳米纤维吸附重金属离子原理示意图

Abbasizadeh 等人<sup>[26]</sup>采用静电纺丝成功制备了聚乙烯醇/硫酸化二氧化钛复合纳米纤维膜,并研究了其对重金属钍和铀的吸附性能。试验发现,聚乙烯醇/硫酸化二氧化钛复合纳米纤维膜对  $\text{Th}^{+3}$  和  $\text{U}^{+6}$  两种重金属离子的吸附属于物理吸附,吸附过程分为两个阶段,第一阶段吸附速率快,第二阶段吸附速率慢。最佳吸附情况是当 pH 为 4.5 和 5.0,温度为  $45^\circ\text{C}$  时,对  $\text{Th}^{+3}$  和  $\text{U}^{+6}$  两种重金属离子的吸附容量最大为 238、196 mg/g。Aliabadai 等人<sup>[27]</sup>对 PEO/CS 复合纳米纤维膜在工业废水中的  $\text{Ni}^{+2}$ 、 $\text{Cd}^{+2}$ 、 $\text{Pb}^{+2}$ 、 $\text{Cu}^{+2}$  等重金属离子的吸附研究中发现,当这 4 种离子全部存在的情况下,其吸附是具有选择性的,吸附顺序依次是  $\text{Ni}^{+2}$ 、 $\text{Cu}^{+2}$ 、 $\text{Cd}^{+2}$ 、 $\text{Pb}^{+2}$ ,而且吸附率也依次减少,分别为 89%、82%、72%、68%。Sengupta 等人<sup>[28]</sup>通过静电纺丝制备出羧基化 PAN 纳米纤维,试验发现在  $\text{Ca}^{+2}$ 、 $\text{Mg}^{+2}$ 、 $\text{Cu}^{+2}$ 、 $\text{Pb}^{+2}$ 、 $\text{Ni}^{+2}$  等多种离子溶液中,该纳米纤维优先吸附重金属离子  $\text{Cu}^{+2}$ 、 $\text{Pb}^{+2}$ ,证明其在浓度较高的多种金属离子溶液中对重金属离子的吸附是具有选择性的。

### 2.3 空气过滤

随着城镇建设和工业化的加速推进,我国的空气污染日益严重,特别是近年来,空气中 PM2.5 污染问题越来越严重。空气污染会对人体健康产生相当大的危害,根据世界卫生组织报道,全球每年超过 200 万人因空气污染而死亡<sup>[29]</sup>。传统的纤维过滤材料主要是通过布朗扩散、惯性碰撞、截留、重力沉降等机械阻挡作用来过滤空气中的微粒,对亚微米粒子过滤效果不理想<sup>[30-31]</sup>。而静电纺丝法制得的纳米纤维膜的过滤机理是由拦截效应、惯性效应、扩散效应、重力效应及静电效应 5 种机理共同作用,能够有效过滤直径为  $0.1\sim 0.5\ \mu\text{m}$  的粒子<sup>[30]</sup>。

Leungi 等人<sup>[32]</sup>通过静电纺制备出平均直径为

208 nm的聚氧乙烯纳米纤维膜,并用其进行了气流速度、纳米纤维的堆积密度及厚度对空气过滤性能影响的研究试验。研究表明,将纳米纤维膜做成多层结构可以有效提高过滤效率,降低过滤阻力。Heikkila 等人<sup>[33]</sup>通过静电纺制备出壳聚糖-聚碳酸酯复合纳米纤维,并对其进行了空气过滤试验,试验发现其空气渗透率比较优秀,可以应用于空气过滤领域。目前已成功开发的静电纺丝空气过滤用纳米纤维有聚醚砜(PES)、聚碳酸酯(PC)、聚氧乙烯(PEO)、尼龙66(PA66)、尼龙6(PA6)、聚丙烯腈(PAN)、聚乙烯醇(PVA)等有机高分子聚合物<sup>[30]</sup>。

### 3 电子元件

#### 3.1 超级电容器

超级电容器(ESC)因具有充电时间短、功率密度大、节约能源、环境友好及使用寿命长等特点,在通信设备、军事装备、家用电器、能源交通等领域得到了广泛研究和应用<sup>[34]</sup>。超级电容器一般由4部分组成,其基本结构见图2<sup>[35]</sup>。

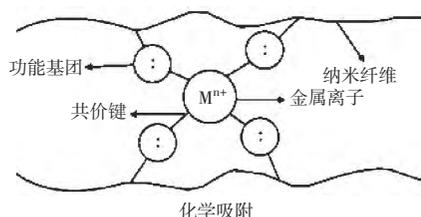


图2 超级电容器结构示意图

研究表明,电极和电解质材料是决定超级电容器电化学性能的主要因素,而隔膜材料是影响电解质离子通过率的重要因素。所以从材料角度讲,电极材料和隔膜材料的选择和改性都是超级电容器研究的重点。目前电极材料的研究重点是如何得到更大的有效表面积和高效的价格便宜的导电材料,隔膜材料的研究重点则是如何获得更薄、结构稳定、化学稳定、高机械强度和韧性、高耐磨性、非电子导体等特点的材料。静电纺丝纳米纤维材料体系广泛、结构可控且稳定、成分可调,特别是其巨大的纳米表面和网络孔隙结构,使其成为制备超级电容器电极和隔膜的理想材料<sup>[35-36]</sup>。Guo 等人<sup>[37]</sup>将多壁碳纳米管加入聚偏氟乙烯(PVDF)溶液中,通过静电纺丝制备 MWCNT/CNF 的电极材料,由于碳纳米管镶嵌在碳纤维的表面,因此电极的导电性、电容量都得到提高。Zou 等人<sup>[38]</sup>通过静电纺丝制备出多孔 C-Sn/SnO<sub>x</sub> 纳米纤维复合电极材料,其具有良好的比表面积、电容量,且电极的循环寿命得到提

升。Laforgue 等人<sup>[39]</sup>通过静电纺丝制备出3,4-乙炔二氧噻吩(PEDOT)薄膜作为电极材料的超级电容器,其电容量在聚合物电解质下可达30 mA/hg,且经上万次循环使用之后,电容量依然可以保持在90%左右。静电纺丝制备超级电容器隔膜常用材料有聚乙烯、聚丙烯、聚丙烯腈、聚偏氟乙烯、纤维素等聚合物<sup>[34]</sup>。研究表明,超级电容器隔膜越薄、孔隙率越高,其离子透过性、电容器阻抗性、传递和储存能量等电容器性能就越好。Dong 等人<sup>[40]</sup>通过静电纺丝制备出高离子传导性的纳米纤维膜,其离子通过率高达1.5 S/cm,比其他方法制备的纳米纤维膜高,已被成功运用于充电电池或超级电容器。

#### 3.2 传感器

全球每年有许多人因CO、NO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、HCHO(甲醛)等有毒气体和食物重金属中毒而死亡,因此能快速、准确地检测有毒气体的气体传感器和用于食品检测的光化学传感器对避免这类安全事故起着至关重要的作用。静电纺丝纳米纤维由于容易控制纤维形貌和纤维改性,且直径小、比表面积大、孔隙率高、吸附性好,所以在对气体、金属离子等多个领域的检测中具有高灵敏性、快捷性。静电纺丝纳米纤维在传感器领域具有很多优势,例如简化工艺、降低成本,提高稳定性、灵敏性、材料柔软性,减少传感器尺寸等,因此有利于微型、高灵敏的传感器制造技术的快速发展<sup>[41-42]</sup>。

Lim 等人<sup>[43]</sup>通过静电纺制备氧化锌(ZnO)纳米纤维,并将其应用于气敏传感器。研究表明其可以被用于乙醇、丙酮、氢气、二氧化氮、二氧化碳等多种气体的气体传感器。Wang 等人<sup>[44]</sup>通过静电纺和溶胶-凝胶两种方法复合制备出TiO<sub>2</sub>纳米纤维,其纳米多孔TiO<sub>2</sub>的比表面积可达65.72 m<sup>2</sup>/g,这种基于TiO<sub>2</sub>和聚合物的复合纳米纤维材料可用于甲醛气体的快速检测,且具有检测极限低(约1×10<sup>-6</sup>)的优点。Zhang 等人<sup>[45]</sup>通过静电纺制备了聚琥珀酰亚胺纳米纤维膜,然后进行化学改性,最后得到聚天冬氨酸静电纺丝纳米纤维薄膜,其对碱性条件下的Cu<sup>2+</sup>具有高选择性和灵敏度,测限为0.01 mg/L。

### 4 结语

纳米纤维由于具有独特的性能,在生物医学、过滤材料、智能化微电子元件等领域有着其他材料无法比拟的优点,因此其在以上领域具有很大的发展前景。静电纺丝技术是目前最有效的制备纳米纤维的方法之

一,具有设备简单、操作性强、高效等优点,但是当前的静电纺丝技术还不成熟,面临诸如批量生产、纤维强力、高电压生产等问题有待研究和解决。未来随着静电纺丝技术从实验室走向工业化生产,静电纺丝纳米纤维将会得到更加广泛的应用和发展。



#### 参考文献:

- [1] BHARDWAJ N, KUNDU S C. Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, 28(3): 325-347.
- [2] CHAE T, KO F, CHAE T, et al. Electrospun nanofibrous tissue scaffolds [M]. British: Woolhead Publishing, 2017.
- [3] WANG L, WU Y, HU T, et al. Electrospun conductive nanofibrous scaffolds for engineering cardiac tissue and 3D bioactuators [J]. *Acta Biomaterialia*, 2017(59): 68-81.
- [4] YANG S Y, HWANG T H, CHE L, et al. Membrane-reinforced three-dimensional electrospun silk fibroin scaffolds for bone tissue engineering [J]. *Biomedical Materials*, 2015, 10(3): 21-35.
- [5] CHEN S, HE Z, XU G, et al. Fabrication of nanofibrous tubular scaffolds for bone tissue engineering [J]. *Materials Letters*, 2016(182): 289-293.
- [6] SANTORO M, SHAH S R, WALKER J L, et al. Poly(lactic acid) nanofibrous scaffolds for tissue engineering [J]. *Adv Drug Deliv Rev*, 2016(107): 206-212.
- [7] MURPHY C M, HAUGH M G, O'BRIEN F J. The effect of mean pore size on cell attachment, proliferation and migration in collagen-glycosaminoglycan scaffolds for bone tissue engineering [J]. *Biomaterials*, 2010, 31(3): 461.
- [8] YUAN B, JIN Y, SUN Y, et al. Artificial vessels: A strategy for depositing different types of cells in three dimensions to mimic tubular structures in tissues [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(7): 890-896.
- [9] HU X, LIU S, ZHOU G, et al. Electrospinning of polymeric nanofibers for drug delivery applications [J]. *Journal of Controlled Release*, 2014, 185(27): 12-21.
- [10] THAKKAR S, MISRA M. Electrospun polymeric nanofibers: New horizons in drug delivery [J]. *European Journal of Pharmaceutical Sciences Official Journal of the European Federation for Pharmaceutical Sciences*, 2017(107): 148-167.
- [11] WONGKANYA R, CHUYSINUAN P, PENGSIK C, et al. Electrospinning of alginate/soy protein isolated nanofibers and their release characteristics for biomedical applications [J]. *Journal of Science Advanced Materials & Devices*, 2017, 2(3): 309-316.
- [12] KIATYONGCHAI T, WONGSASULAK S, YOVIDHYA T. Coaxial electrospinning and release characteristics of cellulose acetate-gelatin blend encapsulating a model drug [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, 131(8): 631-644.
- [13] MANOUKIAN O S, AHMAD A, MARIN C, et al. Bioactive nanofiber dressings for wound healing [J]. *Functional Biomaterials*, 2016(2): 451-481.
- [14] LIU M, DUAN X P, LI Y M, et al. Electrospun nanofibers for wound healing [J]. *Materials Science & Engineering C Materials for Biological Applications*, 2017(76): 1413-1423.
- [15] CHEN J P, CHANG G Y, CHEN J K. Electrospun collagen/chitosan nanofibrous membrane as wound dressing [J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2008, 313(1): 183-188.
- [16] JEONG L, CHO D, KWON O H, et al. Cellular response of silk fibroin nanofibers containing silver nanoparticles in vitro [J]. *Macromolecular Research*, 2014, 22(7): 796-803.
- [17] SHENG X, FAN L, HE C, et al. Vitamin E-loaded silk fibroin nanofibrous mats fabricated by green process for skin care application [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2013, 56(5): 49.
- [18] AHMED F E, LALIA B S, HASHAIKEH R. A review on electrospinning for membrane fabrication: Challenges and applications [J]. *Desalination*, 2015(356): 15-30.
- [19] QIN X, SUBIANTO S. Electrospun nanofibers for filtration applications [M]. British: Woolhead Publishing, 2017.
- [20] XIONG L, YU X, CHENG C, et al. Electrospun superhydrophobic organic/inorganic composite nanofibrous membranes for membrane distillation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(39): 21919.
- [21] AHMED F E, LALIA B S, HILAL N, et al. Underwater superoleophobic cellulose/electrospun PVDF-HFP membranes for efficient oil/water separation [J]. *Desalination*, 2014, 344(344): 48-54.
- [22] JIANG Z, TIJING L D, AMARJARGAL A, et al. Removal of oil from water using magnetic bicomponent composite nanofibers fabricated by electrospinning [J]. *Composites Part B Engineering*, 2015(77): 311-318.
- [23] TIAN Y, WU M, LIU R, et al. Electrospun membrane of cellulose acetate for heavy metal ion adsorption in water treatment [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 83(2): 743-748.
- [24] SONG J, KONG H, JANG J. Adsorption of heavy metal ions from aqueous solution by polyrhodanine-encapsulated magnetic nanoparticles [J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2011, 359(2): 505-511.
- [25] LEE S H, JEONG Y G, YOON Y I, et al. Hydrolysis of oxidized polyacrylonitrile nanofibrous webs and selective adsorption of harmful heavy metal ions [J]. *Polymer Degradation & Stability*, 2017(143): 207-213.
- [26] ABBASIZADEH S, KESHTKAR A R, MOUSAVIAN M A. Preparation of a novel electrospun polyvinyl alcohol/titanium oxide nanofiber adsorbent modified with mercapto groups for uranium(VI) and thorium(IV) removal from aqueous solution [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 220(6): 161-171.
- [27] ALIABADI M, IRANI M, ISMAEILI J, et al. Electrospun nanofiber membrane of PEO/Chitosan for the adsorption of nickel, cadmium, lead and copper ions from aqueous solution [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 220(11): 237-243.

- [28] JASSAL M, BHOWMICK S, SENGUPTA S, et al. Hydrolyzed poly (acrylonitrile) electrospun Ion-exchange fibers [J]. Environmental Engineering Science, 2014, 31(6):288.
- [29] WAN H, NA W, YANG J, et al. Hierarchically structured polysulfone/titania fibrous membranes with enhanced air filtration performance [J]. J Colloid Interface Sci, 2014, 417(3):18-26.
- [30] THAVASI V, SINGH G, RAMAKRISHNA S. Electrospun nanofibers in energy and environmental applications [J]. Energy & Environmental Science, 2008, 1(2):205-221.
- [31] SUNDARRAJAN S, TAN K L, LIM S H, et al. Electrospun nanofibers for air filtration applications [J]. Procedia Engineering, 2014(75):159-163.
- [32] LEUNG W F, HUNG C H, YUEN P T. Effect of face velocity, nanofiber packing density and thickness on filtration performance of filters with nanofibers coated on a substrate [J]. Separation & Purification Technology, 2010, 71(1):30-37.
- [33] HEIKKILÄ P, TAIPAL A, LEHTIMÄKI M, et al. Electrospinning of polyamides with different chain compositions for filtration application [J]. Polymer Engineering & Science, 2008, 48(6):1168-1176.
- [34] LEE E, KIM M, JU J, et al. The electrochemical enhancement due to the aligned structural effect of carbon nanofibers in a supercapacitor electrode [J]. Synthetic Metals, 2017(226):195-206.
- [35] PANDOLFO A G, HOLLENKAMP A F. Carbon properties and their role in supercapacitors [J]. Journal of Power Sources, 2006, 157(1):11-27.
- [36] HALL P J, MIRZAEIAN M, FLETCHER S I, et al. Energy storage in electrochemical capacitors: designing functional materials to improve performance [J]. Energy & Environmental Science, 2010, 3(9):1238-1251.
- [37] GUO Q, ZHOU X, LI X, et al. Supercapacitors based on hybrid carbon nanofibers containing multiwalled carbon nanotubes [J]. Journal of Materials Chemistry, 2009, 19(18):2810-2816.
- [38] ZOU L, GAN L, LV R, et al. A film of porous carbon nanofibers that contain Sn/SnO<sub>x</sub> nanoparticles in the pores and its electrochemical performance as an anode material for lithium ion batteries [J]. Carbon, 2011, 49(1):89-95.
- [39] LAFORGUE A. All-textile flexible supercapacitors using electrospun poly(3,4-Ethylenedioxythiophene) nanofibers [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(1):559-564.
- [40] DONG B, GWEE L, SALASDE I C D, et al. Super proton conductive high-purity nafion nanofibers [J]. Nano Letters, 2010, 10(9):3785.
- [41] BARBOSA V M, BARBOSA A F, BETTINI J, et al. Direct extraction of lead (II) from untreated human blood serum using restricted access carbon nanotubes and its determination by atomic absorption spectrometry [J]. Talanta, 2016(147):478.
- [42] FENG C, KOU X, CHEN B, et al. One-pot synthesis of In doped NiO nanofibers and their gas sensing properties [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2017, 253.
- [43] LIM Y T, SON J Y, RHEE J S. Vertical ZnO nanorod array as an effective hydrogen gas sensor [J]. Ceramics International, 2013, 39(1):887-890.
- [44] WANG X, CUI F, LIN J, et al. Functionalized nanoporous TiO<sub>2</sub> fibers on quartz crystal microbalance platform for formaldehyde sensor [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2012, 171-172(8):658-665.
- [45] ZHANG C, WAN L Y, WU S, et al. A reversible colorimetric chemosensor for naked-eye detection of copper ions using poly(aspartic acid) nanofibrous hydrogel [J]. Dyes & Pigments, 2015(123):380-385.

## 《上海纺织科技》征稿启事

《上海纺织科技》已连续七届(1992、1996、2000、2004、2008、2011、2014年)被评为全国中文核心期刊,2013年中国科技核心期刊,2015年RCCSE中国核心学术期刊。现将本刊来稿要求公示如下:

(1)内容翔实,数据精确,层次清楚,论点鲜明,行文规范流畅,以5000字以内为宜。作者可通过在线投稿系统 <http://sfxk.cbpt.cnki.net> 或 <http://tg.cntexcloud.com> 投稿,两者选其一即可。作者需先注册、登录后,方可投稿。

(2)标题、作者名、摘要(100~200字,包括目的、方法、结果、结论)、关键词和所在单位全称,均要求中英文对照,并提供第一作者简介(包括姓名、性别、出生年份、籍贯、职称或职务、从事的研究工作或研究方向)以及详细的通信地址和有效联络方式。基金项目应注明项目名称及编号。

(3)稿件中应尽量避免繁杂的数学理论公式推导。

(4)参考文献应根据GB/T 7714—2015《信息与文献 参考文献著录规则》的要求详细列出作者名、题名、书/刊名、出版年份、卷期号、起止页码,图书应有出版者及出版地,报纸、网页还应注明年月日、版次、网址。稿件录用与否一般在一个月内答复。