

# 静电纺丝聚合物纤维的研究进展

王磊<sup>1</sup>, 张立群<sup>1,2</sup>, 田明<sup>1</sup>

(1. 北京市新型高分子材料制备与加工重点实验室, 北京 100029;

2. 北京化工大学教育部纳米材料重点实验室, 北京 100029)

**摘要:**介绍了静电纺丝法制备聚合物纤维的原理及其影响因素, 综述了国内外静电纺丝聚合物纤维的研究进展及其应用状况, 指出了静电纺丝聚合物纤维需要解决的若干问题, 并对静电纺丝技术的发展进行了展望。

**关键词:**静电纺丝; 聚合物纤维; 进展

中图分类号: TQ340.64

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2009)02-0028-04

## Advances in fabrication of polymer fibers by electrospinning

WANG Lei<sup>1</sup>, ZHANG Li-qun<sup>1,2</sup>, TIAN Ming<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Preparation and Processing of Novel Polymer Materials, Beijing 100029, China; 2. Key Laboratory of Education Ministry for Nano-Materials, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In this paper, the mechanism and the factors of electrospinning process for polymer fiber production are introduced, the research progress in polymer fibers by electrospinning and its application are reviewed. Also, some problems to be solved in future on electrospinning polymer fibers are proposed, and the development prospect of the electrospinning is as well forecasted.

**Key words:** electrospinning; polymer fibers; progress

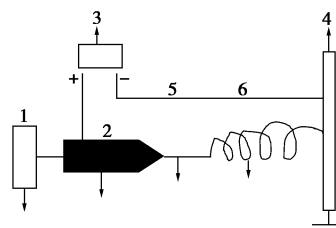
传统的纺丝方法包括熔融纺丝、溶液纺丝、液晶纺丝和胶体纺丝等, 所得纤维的直径一般都在微米级别。而静电纺丝法是一种有别于传统纺丝法的纺丝工艺, 可以得到亚微米和纳米级别的超细纤维。静电纺丝技术最早由 Formhals<sup>[1]</sup> 在 1934 年实现。20 世纪 90 年代以后, 随着纳米材料和纳米技术研究的兴起, 静电纺丝技术逐渐引起人们的重视, 而且发展迅速, 静电纺丝法作为一种简便且广泛适用的纳米纤维的制备方法, 引起了人们浓厚的兴趣, 并且已经得到了深入的研究。目前, 通过静电纺丝法已经将多种天然聚合物和合成聚合物纺成纳米纤维。由于纳米纤维具有大比表面积和表面多孔性等特性, 所以静电纺丝纳米纤维在过滤器、组织工程支架、生物工程、临床医学、超敏传感器等方面具有巨大的应用价值。

## 1 原理及影响因素

### 1.1 原理

静电纺丝法的原理是利用聚合物溶液或熔体借

助静电作用进行喷射拉伸而获得连续超细纤维的加工方法。图 1 为静电纺丝装置示意图。



1—注射泵; 2—溶液储存器; 3—高压电源; 4—收集装置;  
5—射流区; 6—不稳定区

图 1 静电纺丝装置示意图

### 1.2 影响因素

影响静电纺丝的因素和工艺参数有很多, 可以归为 2 类: ①体系因素, 包括聚合物的分子质量、分子质量分布、支化或线性结构、溶液性质(黏度、电导率、介电常数、表面张力、载电荷能力)等; ②电纺工艺参数, 包括电压、溶液流动速率和浓度、喷丝口的尺寸、喷丝口与接收器的距离、环境条件(温度、湿

收稿日期: 2008-09-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50873008)

作者简介: 王磊(1985-), 男, 硕士生; 田明(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为橡胶纳米增强和功能弹性体材料, 通讯联系人, tianm@mail.buct.edu.cn.

度、空气流动速率)等。

Deitzel 等<sup>[2]</sup>研究了工艺参数对静电纺聚氧化乙烯纳米纤维的形态以及制备的无纺布性能的影响。他们发现,溶液的流动速率、静电电压、溶液的浓度、黏度和表面张力等因素对纳米纤维的形态有显著影响。提高静电电压降低了起始射流的稳定性,导致纤维中串珠缺陷的数量增加。纤维的直径随着溶液浓度的增加而增大,当溶液质量分数达到8%或更高时,纤维直径出现了双峰分布。Demir 等<sup>[3]</sup>利用静电纺丝法从聚氨酯溶液中纺出超细弹性纤维,随着浓度的变化,直径分布为7 nm ~ 1.5 μm。低浓度会促使带有串珠纤维的形成,而提高浓度则有利于形成卷曲纤维,纤维的直径随浓度的增加而增大,在最高浓度时直径呈三峰分布,而且发现通过提高溶液温度可改善电纺纤维的形貌。

Koski 等<sup>[4]</sup>在研究聚乙烯醇(PVA)的静电纺丝时证明了适当的链缠绕对纤维的形成是必要的。Santi 等<sup>[5]</sup>发现,低分子质量的聚乙二醇醚-聚二甲基硅烷-聚乙二醇醚(PEG-PDMS-PEG)嵌段共聚物溶液无法单独纺丝,但加入少量高分子质量聚氧化乙烯(PEO)后,溶液可纺性增加,得到的纤维仍然带有珠串缺陷。随着 PEO 含量的增加,珠串纤维的数量逐渐减少,纤维形貌趋于完善。Fong 等<sup>[6]</sup>在静电纺聚氧化乙烯(PEO)的水溶液时加入 NaCl,发现随着 NaCl 的不断加入,溶液电荷密度显著提高,纤维形态从带有珠串缺陷逐渐变得光滑均一。方壮熙等<sup>[7]</sup>在研究超细聚 β-羟基丁酸戊酸酯(PHBV)电纺纤维时指出,当接收距离较小时,溶剂挥发不充分,残留的溶剂会使纤维重新溶解粘连,破坏纤维形貌,而当接收距离适宜时,少量残留的溶剂使纤维之间的交联点粘连,则有利于改善纤维网的稳定性,提高强度。

## 2 聚合物纤维制备方法

目前已有多种天然聚合物和合成聚合物通过静电纺丝技术纺成纤维。表1列出了近年来通过静电纺丝技术制备的部分聚合物纤维及其直径分布。

利用静电纺丝法不仅可将单一聚合物纺成纤维,而且还可通过静电纺制备出聚合物复合材料纳米纤维,如聚己内酯(PCL)/金、聚氨酯(PU)/碳管、聚乙烯醇(PVA)/二氧化硅等复合纳米纤维<sup>[8-9]</sup>。Jeong 等<sup>[8]</sup>将 MWNTs 进行羧基化和酰胺化处理,与尼龙/甲酸溶液混合后,通过静电纺丝制备出具有导电性能的 MWNTs/尼龙复合纳米纤维。Lala 等<sup>[10]</sup>将硝酸银溶解在 DMF 中,分别与聚丙烯腈(PAN)溶液、

表1 近年来静电纺丝技术制备的聚合物纤维及其直径分布

聚合物	纤维直径分布/nm
聚氧化乙烯(PEO)	50 ~ 5000
MPD-I	30 ~ 1000
SBS	100 左右
PBI	300 左右
DNA	50 ~ 80
拟蛋白缩氨酸	200 ~ 3000
聚环氧乙烷+聚苯胺	950 ~ 2100
聚丙烯,氨基甲酸酯	500 ~ 5000
聚丙烯腈	150 ~ 480
聚环氧乙烷	150 ~ 450
聚乙烯醇/醋酸镍	50 ~ 100
乙基氧乙基纤维素	250 ~ 750
聚乙二醇	50 ~ 5000
聚乙二醇+聚苯胺	950 ~ 2100
重组蛋白质	300 ~ 1500
弹性多肽	200 ~ 3000
聚乳酸	50 左右
聚氨酯	100 左右
间亚苯基间苯二酰胺	150 左右
聚苯并咪唑	300 左右
聚乙烯醇	100 ~ 1000
聚对苯二甲酸对苯二胺	40 ~ 500
尼龙-6+无机微粒	500 左右
聚乙烯醇吡咯烷酮	100 ~ 1000
各种导电高分子	20 ~ 500

醋酸纤维(CA)溶液、聚氯乙烯(PVC)溶液均匀混合后,通过静电纺丝制备出具有抗菌性能的银/PAN、银/CA 和银/PVC 纳米纤维。

最近研究报道了一种拓展的静电纺丝技术,即将聚合物溶液与低分子质量金属化合物(或原位生成的低分子质量金属化合物)均匀混合后,先利用静电纺丝制备出以聚合物为载体的纳米纤维,然后用高温烧结去除聚合物载体制备出陶瓷或金属纳米纤维<sup>[9]</sup>。Tomer 等<sup>[11]</sup>将丙基钛酸酯与 PVP/乙醇溶液均匀混合后,利用静电纺丝法制备出以 PVP 为载体的纳米纤维,然后在空气中热裂解去除 PVP 载体,制备出二氧化钛纳米纤维。静电纺丝前在混合溶液中加入氧化钪粒子,就可以制备出钪/二氧化钛纳米纤维,在光电转化领域有重要应用价值。刘艳等<sup>[12]</sup>

以水作为溶剂、聚乙烯醇作为络合剂与醋酸锌反应制得聚乙烯醇/醋酸锌前驱体,采用静电纺丝法制得聚乙烯醇/醋酸锌复合纤维,经煅烧后得到直径为 100 nm 的纯氧化锌无机纳米纤维。

利用静电纺丝法还可以制备不同纤维结构和堆砌结构的纳米纤维。同济大学的黄争鸣等<sup>[13]</sup>采用同轴静电纺丝法,将药物硫酸庆大霉素和白藜芦醇分别作为可生物降解的 PCL 纳米纤维的核,制备得到的核-壳结构的复合纳米纤维有望应用于外科手术的缝合线、伤口包覆材料等。另外,以静电纺丝纳米纤维为模板,利用化学或物理气相沉积法或者静电喷涂技术,在模板上涂覆一层薄壁材料,然后通过热分解或溶剂溶解去除模板,可以得到聚合物纳米管、金属纳米管和陶瓷纳米管<sup>[14]</sup>。

目前通过静电纺丝成功制备出的聚合物纳米纤维基本上是常温下处于玻璃态或结晶态的聚合物基体,因为这些聚合物的大分子在静电诱导下被高倍拉伸而喷射出纤维后,在溶剂的快速挥发过程中或快速降温冷却过程中能够迅速重新转变为玻璃态或结晶态而固定下来,纤维不变形,容易控制纺丝过程的连续性和稳定性。这包括采用聚氨酯、苯乙烯-丁二烯嵌段共聚热塑性弹性体制备的弹性纳米纤维,其中的结晶区或玻璃态区能够在溶剂挥发的同时迅速重新形成,有利于纤维形状的保持<sup>[15-16]</sup>。然而,对于常温处于高弹态的聚合物(如橡胶)很少有文献研究报道<sup>[17]</sup>。主要原因在于:橡胶大分子构象数多,玻璃化转变温度在 0℃ 以下,常温下不结晶,具有高弹性,大分子链的活动能力强,分子链松弛时间很短,造成电纺时 4 个问题难以解决:①在喷丝过程中,溶剂快速挥发的同时,纤维因橡胶分子的高弹形变快速回复,在喷丝口附近发生扰动,很难控制纺丝的连续性和稳定性,纤维表面也时常有液珠;②高度拉伸的橡胶纤维因高弹形变快速回复,造成单根纤维不连续,甚至发生断裂;③纤维直径较粗(1 μm 以上),直径分布较难控制;④最难克服的是未交联的处于高弹态的橡胶纤维在重力作用下形状很快发生变化,瘫塌变形,特别是在纤维搭接处易发生融并,导致纤维堆砌在一起可能形成薄膜,难以保持纤维的形貌。Viriyabanthorn 等<sup>[17]</sup>研究了炭黑(250~350 nm)的用量对静电纺丝丁基橡胶溶液的影响,发现随着炭黑用量的增加,丁基橡胶溶液的可纺性增加,纤维直径减小,纤维尺寸稳定性增加。但是,丁基橡胶纤维的直径大部分在几微米左右,而且由于没有迅速交联,常融并成膜。

笔者在静电纺制备丁腈橡胶纤维过程中,发现纤维形成不连续,特别是在纤维搭接处发生融合,直径变粗,未交联的高弹性纤维长时间停放发生断裂。正是由于这些棘手的问题,通过静电纺丝制备橡胶纳米纤维仍然是一个挑战。

### 3 应用领域

静电纺丝技术是一种简便易行、成本低廉且应用广泛的纳米纤维制备方法。在合适的条件下,可以将多种聚合物纺成纳米级别的超细纤维,并且可以在一定范围内控制纤维的直径、取向以及纺织物的多孔性等特性,其纳米纤维的尺寸为数十纳米至 1 μm 左右(一般为 50~500 nm),具有独特的性能,如高比表面积、优异的力学性能、多孔性、质量轻、成本低等,广泛用于增强增韧聚合物制备高性能、功能性复合材料以及过滤、医学、防护、导电和光学领域等。由于通过静电纺丝法可以比较容易地制备纳米纤维。随着纳米材料在各领域的广泛应用,静电纺丝法的应用范围也将越来越广泛。

#### 3.1 过滤材料

利用静电纺丝方法能够得到直径为几十或几百纳米的纳米级纤维,形成的纤维毡质量轻、渗透性好、比表面积大、孔隙率高、内部孔隙的连通性好,容易与纳米级的化学物质或功能性物质相结合,很适合作为过滤材料。Ki 等<sup>[18]</sup>通过静电纺丝法制备了一种 PAN 纳米纤维过滤材料,与普通的聚烯烃纤维、HEPA 和 ULPA 过滤材料相比,过滤效率显著提高。尽管纳米纤维的过滤性能好,但是处于玻璃态和半结晶态的静电纺纤维很脆弱,需要通过添加垫底来解决这一问题。Wang 等<sup>[19]</sup>制备了一种由静电纺 PVA 交联支架和 PVA 水凝胶涂层组成的新型超滤膜,由于含有少量的交联结构(体积分数 < 5%),该膜具有很高的孔隙率(> 80%)。超滤测试结果发现,PVA 纳米纤维复合膜的过滤效率比薄膜复合材料高几倍,并且其过滤性能还可以通过控制纤维膜的厚度加以调节。

#### 3.2 膜材料

通过静电纺丝技术可以一步完成微孔膜的制备,大大简化了微孔膜的制备过程,并且还可以将制备的微孔膜结构直接喷涂在各种基底上。有专利<sup>[20-22]</sup>报道在可扩展的线形框架上形成静电纺膜,以用于生物医学领域以及各种管和支架材料。通过化学改性、交联及其他的化学处理方法可以很容易实现静电纺微孔膜的功能化<sup>[23-25]</sup>。

### 3.3 生物医学工程

目前,纳米材料和纳米技术在生物医学工程领域的地位日益突出。用于创伤修复的纳米纤维以及用于组织工程的纳米结构材料等更是引起了人们的重视。静电纺丝聚乳酸纳米纤维已经用作骨细胞和间叶干细胞的生长基底,研究发现,细胞能够牢固地黏附在纤维上,并且沿着纤维方向生长<sup>[26]</sup>。纳米纤维的药物缓释效果也得到了证明<sup>[27]</sup>。

## 4 工业化问题

静电纺丝方法的工业化面临2个最大的难题:①静电纺丝工艺的稳定性控制,包括聚合物材料的可纺性、纺丝过程的连续性和稳定性,以及纤维取向控制等;②批量化生产的设备与装置。大多数静电纺纤维都以无纺织物的形式存在,应用范围相对较小。为了扩大应用范围,需要收集得到平行排列的纤维。Jaeger等<sup>[28]</sup>设计了双阳极的静电纺丝装置,以控制纺丝过程的稳定性。采用此装置得到了排列方向较为一致的纤维,并且缩小了收集器上收集到的纤维的聚集面积。Wnek和Simpson<sup>[29-30]</sup>设计了一种旋转滚筒接收器,制备了具有一定程度取向的聚乳酸纳米纤维和I型胶原蛋白纳米纤维。但是,这种纤维的取向度不高,如果要得到完全平行排列的纤维,需要转筒有很高的转速,不过这样会破坏溶液射流。Theron<sup>[31]</sup>对旋转转筒接收器进行了改进,设计出一种铁饼型收集器,采用这种方法制备的PEO纤维是取向排列的。为了获得单根纳米纤维,Huang<sup>[32]</sup>发展了另外一种收集平行排列纤维的方法,就是将矩形框架放置于溶液射流下方,这种方法也可以制备出具有一定取向程度的纤维。另外,Li等<sup>[33]</sup>报道了一种平行电极收集器,也可以制备平行取向排列的纳米纤维。为了增加静电纺丝的产量,研究者<sup>[34]</sup>提出使用多喷嘴同时纺丝。吴大诚等<sup>[35]</sup>在喷丝头上增加了供气系统,利用气流拉伸和静电力拉伸的共同作用,提高了纳米纤维制备的可控性和产量。该法的产量是标准电纺的几倍甚至几十倍。

目前,静电纺丝技术还处于实验室研究阶段,纤维产量低,难以实现批量化生产,还没有实现真正的工业化。

## 5 问题和展望

尽管静电纺丝方法简单,适用于许多聚合物体系制备出纳米纤维,应用领域广泛,但是仍然存在诸多问题亟待解决。由于静电纺丝法不能得到彼此分

离的长丝和短纤维,其应用受到限制;产量较低,难以大规模生产和应用;聚合物分子拉伸取向不完善,电纺纤维强度较低。目前,对这些问题的研究已经有了一定的突破,相信在不久的将来随着这些问题的解决,静电纺丝技术会得到更加充分的发展,并在更加广泛的领域里发挥出更为重要的作用。

### 参考文献

- [1] Formhals A. Process and apparatus for preparing artificial threads: US, 1975504[P]. 1934-10-02.
- [2] Deitzel J M, Kleinmeyer J, Harris D, *et al.* The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles[J]. *Polymer*, 2001, 42: 261-272.
- [3] Demir M M, Yilgor I, Yilgor E, *et al.* Electrospinning of polyurethane fibers[J]. *Polymer*, 2002, 43: 3303-3309.
- [4] Koski A, Yim K, Shivkumar. Effect of molecular weight on fibrous PVA produced by electrospinning[J]. *Materials Letters*, 2004, 58: 493-497.
- [5] Santi T, Ittipol J, Paradorn N, *et al.* Ultrafine electrospun poly(ethylene glycol)-polydimethylsiloxane-poly(ethylene glycol) triblock copolymer/poly(ethylene oxide) blend fibers[J]. *Mater Lett*, 2006, 60: 2920.
- [6] Fong H, Chun I, Reneker D H, *et al.* Beaded nanofibers formed during electrospinning[J]. *Polymer*, 1999, 40: 4585.
- [7] 方壮熙, 张璐, 韩涛, 等. PHBV电纺纤维结构与形态的研究[J]. *高分子学报*, 2004(4): 500-505.
- [8] Jeong J S, Jeon S Y, Lee T Y, *et al.* Fabrication of MWNTs/nylon conductive composite nanofibers by electrospinning[J]. *Diamond & Related Materials*, 2006, 15: 1839-1843.
- [9] Chronakis I S. Novel nanocomposites and nanoceramics based on polymer nanofibers using electrospinning process: A review[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 167: 283-193.
- [10] Lala N L, Ramaseshan R, Li Bojun, *et al.* Fabrication of nanofibers with antimicrobial functionality used as filters: Protection against bacterial contaminants[J]. *Biological and Bioengineering*, 2007, 97(6): 1357-1365.
- [11] Tomer V, Teye-Mensah R, Tokash J C, *et al.* Selective emitters for thermophotovoltaics: erbium-modified electrospun titania nanofibers[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, 85: 477-488.
- [12] 刘艳, 夏宁, 陈日耀, 等. 静电纺丝法制备 ZnO 纳米纤维及其光催化性能的研究[J]. *福建师范大学学报*, 2008, 24(1): 66-69.
- [13] 黄争鸣, 杨爱昭. 将源药包覆到聚己内酯超细纤维的芯部[J]. *高分子学报*, 2006(1): 48-52.
- [14] Hou H, Jun Z, Reuning A, *et al.* Poly(p-xylylene) nanotubes by coating and removal of ultra-thin polymer template fibers[J]. *Macromolecules*, 2002, 35: 2429.
- [15] Sen R, Zhao B, Perea D, *et al.* Preparation of single-walled carbon nanotube reinforced polystyrene and polyurethane nanofibers and membranes by electrospinning[J]. *Nano Lett*, 2004, 4: 459-464.
- [16] Fong H, Reneker D H. Elastomeric nanofibers of styrene-butadiene-styrene triblock copolymer[J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 1999, 37: 3488-3493.

散均匀,最后加入一定体积的银氨(或硝酸银)溶液,控制  $\text{OH}^-$  和银离子的浓度,并使还原系统总体积为 25 mL,而后于一定温度,125 r/min 摇床下避光反应并适时取样分析。

### 1.3 贵金属纳米颗粒表征

UV300 紫外可见分光光度计(美国 Unicam 公司)进行 330 ~ 900 nm 扫描,观测银溶胶的表面等离子体共振吸收峰变化;F30 高倍透射电镜(日本 Hitachi 公司)观察颗粒形貌。

### 1.4 贵金属催化剂的制备

(1)化学浸渍法:以一定浓度的  $\text{AgNO}_3$  或  $\text{PdCl}_2$  溶液真空条件下等容浸渍载体,一定时间后取出经烘干、活化制备得到催化剂。

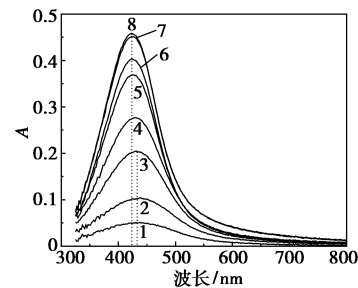
(2)生物还原法:以一定浓度的  $\text{AgNO}_3$  或  $\text{PdCl}_2$  溶液真空条件下等容浸渍载体;按一定比例加入菌粉进行混合,室温条件下进行生化还原,一定时间后取出经烘干、活化制备得到催化剂。或将生物还原得到的纳米金属粉配置成一定浓度的浸渍液,真空条件下等容浸渍载体,一定时间后同样经烘干、活化制备得到催化剂。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 生物还原制备银纳米颗粒

如图 1 所示,在初始银质量浓度  $C_i$  和菌体浓度

$C_b$  均为 1 g/L,  $[\text{OH}^-] = 0.02 \text{ mol/L}$  时,银颗粒特征的表面等离子体共振吸收峰强度约 5 h 后便达到稳定,银还原率达到 90% 以上,产物银溶胶放置几个月也未见沉降,说明适量  $\text{OH}^-$  的引入,实现了快速还原制备银纳米颗粒,而目前国外一些学者建立的生物还原体系一般至少需要几天的反应时间<sup>[20-23]</sup>。笔者所在课题组优选出的其他菌种如气单胞菌 SH10、地衣芽孢杆菌 R08 均能得到类似的结果,只是由于各菌种组成上的差异体现于反应能力上的些许差别。



反应时间/h:1—1.0;2—1.5;3—2.0;4—2.5;5—3.0;6—4.0;  
7—5.0;8—12.0

图 1 干 SH09 菌体还原  $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$  的紫外可见光谱

### 2.2 银纳米颗粒的粒径及分布

对生物还原反应的影响因素进行考察发现,

(上接第 31 页)

[17] Reneker D H, Fong H. Polymeric Nanofibers [M]. Washington D C: American Chemical Society, 2005.

[18] Ki M Y, Christopher J H, Yasuko M, et al. Nanoparticle filtration by electrospun polymer fibers [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62: 4751 - 4759.

[19] Wang X, Fang D, Yoon K, et al. High performance ultra-filtration composite membranes based on poly(vinyl alcohol) hydrogel coating on crosslinked nanofibrous poly(vinyl alcohol) scaffold [J]. Membrane Science, 2006, 278: 261 - 268.

[20] Imperial Chemical Industries PLC. Production of electrostatically spun products: US, 4689186 [P]. 1987 - 08 - 25.

[21] Wendorff, Joachim H, Steinhart M. Production of polymer fibres having nanoscale morphologies: US, 20040013873 [P]. 2004 - 01 - 22.

[22] Bowlin G L. Method of fusing electroprocessed matrices to a substrate: US, 20030088266 [P]. 2003 - 05 - 08.

[23] Donaldson Company Inc. Air filter assembly for filtering an air stream to remove particulate matter entrained in the stream: US, 6716274 [P]. 2004 - 04 - 06.

[24] Donaldson Company Inc. Air filtration arrangements having fluted media constructions and methods: US, 6673136 [P]. 2004 - 01 - 06.

[25] Bamford C H, Al-Lamee K G. Studies of a novel membrane for affinity separations: Functionalisation and protein coupling [J]. J Chrom, 1992,

606: 19 - 31.

[26] Dersch R, Steinhart M, Boudriot U. Nanoprocessing of polymers: Applications in medicine, sensors, catalysis, photonics [J]. Polym Adv Technol, 2005, 16: 276 - 282.

[27] Zeng Jun. Meso- and nanosealed polymer fibers and tubes [D]. Marburg: Philipps-universität Marburg, 2003.

[28] Jaeger R, Bergshoeff M M, Batlle C M I, et al. Electrospinning of ultrathin polymer fibers [J]. Macromol Symp, 1998, 127: 141.

[29] Boland E D, Wnek G E, Simpson D G, et al. J Macromol Sci, 2001, A38 (12): 1231 - 1243.

[30] Matthews J A, Wnek G E, Simpson D G, et al. Electrospinning of collagen nanofibers [J]. Biomacromolecules, 2002, 3(2): 232 - 238.

[31] Theron A, Zussman E, Yarin A L. Electrostatic field-assisted alignment of electrospun nanofibers [J]. Nanotechnology, 2001, 12: 384 - 390.

[32] Huang Z M, Zhang Y Z, Kotakic M, et al. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites [J]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 2223 - 2253.

[33] Dan Li, Yuliang Wang, Younan Xia. Electrospinning of Polymeric and Ceramic Nanofibers as Uniaxially Aligned Arrays [J]. NanoLetters, 2003: 1167 - 1171.

[34] Yarin A L, Zussman E. Upward needleless electrospinning of multiple nanofibers [J]. Polymer, 2004, 45: 2977 - 2980.

[35] Wu D C, Yao Y Y. Preprints of international symposium on polymer physics [C]. Dali, China, 2004: 140 - 141. ■