

电纺法及其在制备聚合物纳米纤维中的应用

卢正险, 延 卫*

(西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 在介绍电纺法的基础上, 对电纺法制备聚合物和导电聚合物纳米纤维的影响参数和电纺纤维的应用研究进行了综述, 同时展望了该方法在制备聚合物纳米纤维方面存在的挑战和机遇。

关键词: 电纺法; 纳米纤维; 聚合物和导电聚合物

引言

科学家们发现, 当物质的颗粒小到纳米量级(0.1~100nm)时, 物质的各种性质(如机械强度、磁、光、声、热等)都将发生变化, 并具有辐射、吸收、吸附等许多新特性, 由此有望制备具有特殊功能的材料^[1]。由于聚合物纳米纤维具有高的比表面积、良好的机械性能, 使其有广泛的应用前景^[2]。

近年来, 人们已开发了一系列制备聚合物纳米纤维的方法, 如纺丝^[3]、模板合成法^[4,5]、相分离法^[6]、自组装方法^[7,8]以及电纺法^[9-11](electrospinning)等。纺丝法与纤维工业中的干纺法类似。它的突出优点是, 可以制备非常长的单根纳米纤维, 但是目前它仅适用于少数几种高粘弹性的聚合物。所谓模板合成法是使用纳米多孔膜作为模板, 通过单体分子在孔内的聚合和沉积, 合成聚合物纳米线或纳米管, 然而它却不能合成连续的纤维材料, 同时模板的去除也较繁杂。相分离法是通过溶解、凝胶、萃取、凝固和干燥等几个步骤, 得到纳米尺寸的多孔泡沫体, 固体聚合物转移到泡沫体孔内, 得到聚合物纳米纤维, 它的缺点是转移过程耗时太长。自组装方法是通过单体或小分子的非化学键相互作用力, 组装成特定形貌聚合物的一种方法, 它和相分离法一样, 也需要较长的时间来形成连续的聚合物纤维。与上述方法相比, 电纺法制备聚合物纳米纤维具有设备简单、操作容易以及高效等优点, 因此它被认为是制备大量聚合物连续纳米纤维最有效的方法^[12]。

虽然电纺法已经出现了近70年^[13], 但是在过去的几十年中这种方法并未引起人们的足够重视。近些年来, 随着纳米科技的发展, 人们对这种方法表现出了越来越高的兴趣^[14]。目前, 文献中已报道的经由电纺法制备纳米纤维及复合纤维的聚合物已达50多种。

由电纺法制备的聚合物纳米纤维具有非常广泛的应用前景, 如用作无机纳米纤维中间体、复合材料中的增强纤维、分离膜材料、化学和生化传感器、药物传输和医药复合物、伤口敷裹材料以及分子纳米电子器件等^[12]。

在本文中, 作者简要地介绍了电纺法, 综述了影响电纺纤维性质的参数和聚合物电纺纤维的应用研究现状, 并分析了电纺法在制备聚合物纳米纤维方面存在的挑战与机遇。

1 电纺法及其影响参数

1.1 电纺法

电纺法制备聚合物纳米纤维的原理如图1所示。整套实验装置可以分为3个部分: 高压电源(30KV)、盛放聚合物溶液或熔体的容器及喷头、接收板^[15]。

聚合物溶液或熔体与高压电源通过导线相连, 接收板接地, 因此在聚合物溶液或熔体与接收板间存

基金项目: 中国科学院化学研究所有机固体开放实验室基金资助课题。

作者简介: 卢正险, 25岁, 硕士研究生, 从事电纺法制备聚合物纳米纤维及其应用研究。

* 通讯联系人: yanwei@mail.xjtu.edu.cn.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

在静电作用。随着电压的升高,静电作用增大,聚合物溶液或熔体克服表面张力的作用,通过喷头喷射出来。当静电作用大于聚合物流的内聚力时,聚合物流在到达收集板之前裂分为许多小的聚合物流^[19]。聚合物流从喷出到到达接收板这段过程中,由于溶剂的挥发(熔体固化),从而在接收板上得到无纺布形式的聚合物纤维^[17](如图 1 所示)。

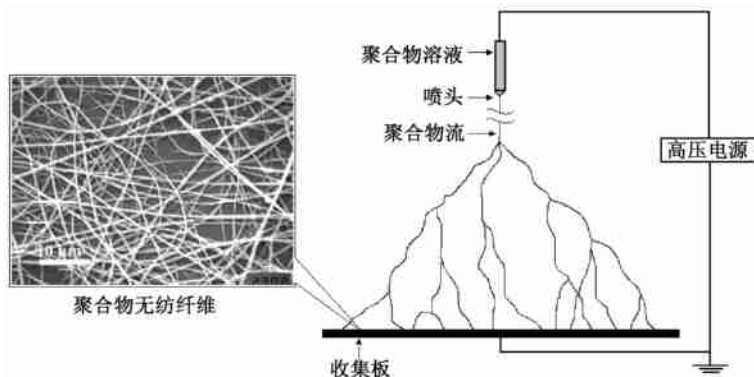


图 1 电纺法制备聚合物纳米纤维原理示意图^[12, 15]

Figure 1 Schematic diagram of synthetic mechanism of polymer nanofibers by electrospinning^[12, 15]

采用特殊的收集装置可以得到规则排列的聚合物纳米纤维。例如,目前普遍采用的方法是利用一个高速旋转的接收转筒来接收,当转筒表面的旋转速度与纤维的沉积速度接近时,便可以得到单轴排列的纤维^[18, 19]。Li 等^[20]还采用由两块平行硅板组成的收集装置,来改变纤维在特殊电场下的受静电力方向,从而得到了单轴排列的聚乙烯基吡咯烷酮(PVP)纳米纤维(如图 2 所示)。同样,在电纺的过程中,于喷头与收集板间加上一个附加电场,在附加电场力的作用下纤维也将进行规则排列^[21]。

目前,文献中报道的经由电纺法制备直径在 3nm 到几微米范围内的聚合物纤维已达 50 多种,这些聚合物纤维绝大部分是采用聚合物溶液电纺制备,只有少数几种是熔融电纺制备。

1.2 影响参数

在聚合物电纺过程中,有许多参数将对电纺过程和电纺纤维的形貌产生影响,具体可分为三大类:(1)体系参数,如聚合物分子量、分子量分布、分子结构(线性,支化等)以及溶液性质(粘度,电导率和表面张力);(2)过程参数,如浓度、外加电压、喷头与收集板之间的距离;(3)环境参数,如温度、湿度和空气流速等^[22]。通过控制上述参数,可以更好地了解电纺过程,从而得到直径均一可控、缺陷可控、连续的聚合物纳米纤维。

1.2.1 聚合物分子量 聚合物的分子量对电纺溶液的流变性能、电导率、介电强度以及表面张力有很大的影响^[23]。Casper 等^[24]研究了聚苯乙烯的分子量对电纺聚苯乙烯纤维表面形态的影响。他们发现分子量增大会使纤维表面出现孔状结构,孔的形状和大小更不均一,孔的大小也将随分子量的增大而增大。Koski 等^[25]还报道了聚乙烯醇重均分子量对电纺纤维结构的影响,发现对于不同重均分子量来说,都各自存在一个电纺临界浓度范围,纤维直径随着重均分子量的增大而增大。

1.2.2 聚合物溶液粘度和浓度 在电纺过程中,聚合物溶液的粘度太低,在收集板上将得不到连续的纤维,产物中存在大量颗粒;粘度太高,将无法从喷头喷出,且容易堵塞喷头。因此,聚合物溶液只有在适当的粘度下,才能电纺成纤维,而且不同的聚合物溶液具有不同的电纺粘度范围。Young 等^[26]发现电纺尼龙 6 的甲酸溶液的粘度范围在 4~55.5P。同样,Liu 等^[29]研究了醋酸纤维素的丙酮/二甲基乙酰胺溶液的电纺情况,它的最佳粘度范围在 1.2~10.2P。

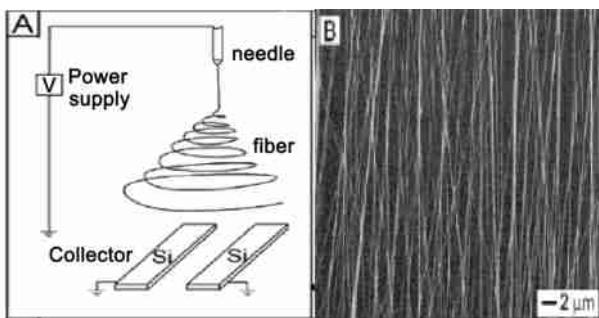


图 2 特殊的电纺收集装置(A)及由其得到的单轴排列 PVP 纳米纤维(B)^[20]

Figure 2 The device for electrospinning with special collector (A) and the orientated PVP nanofibers (B) result from it^[20]

由于聚合物纳米纤维是由聚合物喷射流经过溶剂挥发(熔液固化)后而得到,因而聚合物溶液浓度是影响纤维直径的最主要的因素。Deitzel 等^[27]指出电纺纤维的直径随着聚合物溶液浓度的增大而增大,当聚合物溶液浓度较高时,纤维直径分布变宽。Demir 等^[28]发现纤维直径与聚合物浓度的三次方成正比。另外,聚合物溶液的浓度对纤维的形貌也有一定的影响,如 Fong 等^[29]电纺了浓度范围在 1~4.5%(wt) 的 PEO 溶液,得到了如图 3 所示的电纺纤维 SEM 图。从图中可以看出,在较低电纺溶液浓度下纤维上存在大量的“珠状”结构,随着浓度的增大“珠状”结构较少,当浓度达到 4%(wt) 时,纤维上观察不到“珠状”结构。

1.2.3 外加电压 外加电压的大小决定电纺溶液所受静电力的大小。由于电纺溶液要克服表面张力才能从喷头喷出,因此存在一个聚合物电纺的临界电压使得其所受静电力大于液体的表面张力,临界电压的大小与电纺溶液的浓度、粘度和表面张力有关。例如,Deitzel 等^[27]发现 PEO 溶液的临界电纺电压大约为 5.5kV。

电纺过程中外加电压的大小是影响电纺纤维直径的另一个重要的因素。通常,电压越高则聚合物喷射流越粗,从而所得到的纤维直径也越大^[28]。Deitzel 等^[27]指出外加电压的高低对纤维表面形貌也有影响,随着电压的升高,纤维表面将变得粗糙,当电压高于某一值的时候,纤维表面的“珠状”结构将增加。

1.2.4 喷头与收集板之间的距离 首先喷头与收集板之间要有足够的距离,只有这样聚物流中的溶剂才能在到达收集板之前挥发出去(熔体才能固化),从而在收集板上得到聚合物纳米纤维。同时改变喷头与收集板之间的距离将使电纺纤维的形貌发生变化,在一定的电纺溶液浓度下增大它们之间的距离都会使纤维表面的“珠状”结构减少^[13]。

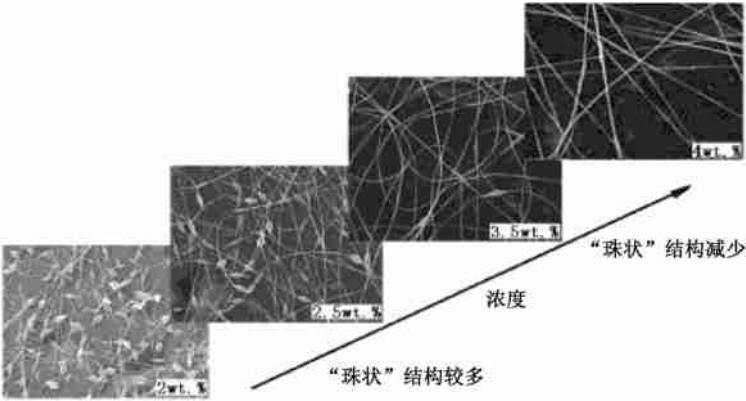


图 3 由不同浓度 PEO 溶液电纺得到的电纺纤维 SEM 图^[29]

Figure 3 SEM photographs of PEO electrospun nanofibers from different concentration solutions^[29]

2 应用前景

聚合物电纺纤维除了具有一般聚合物纳米纤维的特点^[2](高的比表面积、良好的机械和电磁学性能)外,还由于其独特的制备过程,使其更容易与有机或无机物进行复合,得到具有各种特殊功能的复合材料。因此,它们的应用前景非常广泛,也引起了人们极大的关注。

2.1 制备无机纳米纤维

利用传统的方法制备无机纳米纤维不仅工艺复杂,而且较难控制。而将聚合物/无机物复合电纺纤维作为前体,经过煅烧得到无机纳米纤维的新方法,则由于其简便、易控而受到大家的欢迎。

Guan 等^[30~32]先后电纺制备了聚乙烯醇(PVA)/醋酸铜、PVA/醋酸铬和 PVA/醋酸镍复合纤维,然后将它们煅烧分别得到了直径在 50~200nm 的 CuO、CoO₄ 和 NiO 纳米纤维,并发现煅烧温度对纤维的晶相和形貌有很大影响。Viswanathamurthi 等^[33]制备了聚醋酸乙烯酯/氧化铌复合纳米纤维,通过高温煅烧后得到纯的陶瓷氧化铌纤维,纤维的直径由复合纳米纤维中的氧化铌含量决定。人们通过同样的方法还得到了 H₄SiW₁₂O₄₀ 纳米纤维膜、V₂O₅ 纳米纤维和 TiO₂ 锐钛矿^[34~36]。更有趣的是, Wang 等^[37]将电纺得到的聚

丙烯腈纳米纤维经过真空高温热解,得到了碳纳米纤维。

2.2 复合物增强纤维

传统纤维特别是工程纤维,如碳、玻璃和 Kevlar 纤维的一个最重要的应用是在复合物中用作增强材料。通过增强,复合材料将具有更好的力学性能。

目前报道的关于纳米纤维增强复合物的工作主要集中于碳纳米纤维或纳米管(CNTs)复合方面。碳纳米纤维/管具有非常独特的机械、电学及其他一些优良的性能,但是在复合物制备过程中它们很难进行排列,因而不能表现出人们期待的机械性能。因此,有些研究小组已经致力于将碳纳米纤维/管加入到电纺溶液中,电纺得到沿轴向排列的碳纳米纤维和纳米管。Dror 等^[38]将碳纳米管加入到 PEO 电纺溶液中,电纺制备了 CNT/PEO 复合纳米纤维,并使得碳纳米管沿着纤维的轴向排列。Ko 等^[39]将直径为 1.2 ~ 1.6 nm、长 3 μ m 的碳纳米管分散到聚丙烯腈溶液中进行电纺,得到直径为 500 nm ~ 2 μ m 的复合纤维。

另一方面,聚合物纳米纤维也可以直接用作复合物增强材料。Kim 和 Reneker^[40]研究了聚苯并咪唑电纺纳米纤维在环氧树脂和橡胶中的增强效果,分别进行了拉伸、3 点挠度(3-point bending)、双扭转以及撕裂测试。发现随着纤维含量的增加,环氧纳米复合物的弯曲杨氏模量和断裂强度增加不大,断裂能却显著增加;而橡胶纳米复合物与未填充的橡胶材料相比杨氏模量是原来的 10 倍,断裂强度是原来的 2 倍。Bergshoeff 和 Vancso^[41]制备了电纺尼龙-4,6 纳米纤维无纺膜/环氧树脂纳米复合物,其硬度和强度较环氧树脂都显著增大。

2.3 分子纳米电子器件

与普通的聚合物相比,导电聚合物具有其显著的特点:一是通过化学或电化学掺杂,它们的电导率可以在绝缘体、半导体和金属导体的宽广范围内变化($10^{-9} \sim 10^5$ S/cm),而且它们的物理化学和电化学特性强烈地依赖于聚合物的主链结构、掺杂剂的性质和掺杂程度;二是具有颗粒或纤维结构的微观形貌。实验发现颗粒或纤维本身具有金属特性,而它被绝缘的空气所包围,通常用“导电孤岛”来描述;三是具有优异的物理化学特性,如较高的室温电导率、可逆的氧化-还原特性、掺杂时伴随颜色的变化以及快速响应、大的三阶非线性光学系数。导电聚合物独具的优异物理化学特性引起了物理和化学家的广泛兴趣,它在技术上的应用探索已取得了重大的进展^[42]。

导电聚合物纳米纤维可通过电纺法制备,其在纳米电子器件上有很好的应用前景,这些细纤维可用于来制作多种纳米器件,如:纳米导线、发光二极管、光电池和传感器等,还可用来将大量的纳米器件连接成一个更大规模的体系^[46]。

通过电纺,Diaz-de-Leon 已经制备了掺杂态聚苯胺纳米纤维及聚苯胺与聚苯乙烯或 PEO 的复合纤维,并对它们的电学性能进行了表征^[43],发现纤维的电导率与纤维的形貌、组成和使用的溶剂有很大的关系,纤维中聚合物链沿纤维径向排列使得电导率提高。在导电聚合物电纺纤维中存在大量的纤维交叉结构,它们可以用来制作纳米电子连接装置。MacDiarmid 等^[44]制备了平均直径在 139 nm 的聚苯胺(PANI)纤维,同时还制备了不同的樟脑磺酸掺杂聚苯胺(PANI $\cdot$ CSA)聚合物复合纳米纤维,并测试了单根 PANI $\cdot$ CSA/PEO 复合纳米纤维的 I/V 曲线和电导率/温度依赖关系。他们还将聚丙烯腈纳米纤维浸入到吡咯的聚合体系中,得到了附着有 20 ~ 25 nm 厚聚吡咯层的复合纤维。还可通过电沉积方法将金属沉积到了聚合物纤维上。Norris 等^[45]也通过电纺法制备了 PANI $\cdot$ CSA/PEO 复合纤维,并用四探针法测量了无纺纤维层的电导率,它要略低于压片薄膜的电导率。他们还发现由于电纺纤维的高比表面积,它的脱掺杂和再掺杂速率要比压片薄膜快 1 个数量级。这些纳米纤维在纳米导线、发光二极管、光电池和传感器等方面有很好的应用前景^[46]。

通过调节聚合物电纺溶液的组分,在其中加入其他聚合物或填充物,可以得到具有特定功能的光响应聚合物材料,这种材料在制备电子器件方面具有广泛的应用前景。Drew 等^[47]在(聚丙烯腈)PAN 溶液中加入偶氮染料刚果红进行电纺,得到了具有光电性能的聚合物复合纤维。

2.4 生物医学和药物应用

聚合物纳米纤维在生物医学和药物上的应用是另一个活跃的研究领域。

从生物学的观点来看,几乎所有的人体组织和器官都具有纳米纤维的形式和结构。如,骨骼、胶原质、软骨和皮肤等。因此,可以通过特殊的电纺纤维来制备各种人体组织和器官。Xu 等^[47]制备了用于血管工程的定向排列聚(*L*-交酯-co-ε-己内酯)电纺纤维,其具有较好的细胞附着与繁殖性能。Byung-Moo 和 Hyoun-Joon^[48,49]研究小组电纺制备了蚕丝蛋白纤维无纺布。由于蚕丝蛋白纳米纤维具有多孔、孔径分布广以及高比表面积等特点,这有利于细胞的附着、生长和繁殖,因此可将它用于人体角化细胞、纤维原细胞和骨髓基质细胞的培养。他们的研究表明蚕丝蛋白纳米纤维具有很好的生物医药应用前景,它可以用作伤口的敷裹材料和组织工程的骨架。

一般来说,药物和药物胶囊的涂布材料尺寸越小(比表面积越大),人体对药物的吸收就越好。聚合物纳米纤维在药物传输材料方面的应用正是依据了这一规则。最近,Zeng 等^[50]运用电纺法制备了应用在生物医药方面的生物降解性聚(*L*-乳酸)纳米纤维。通过在电纺溶液中加入不同的表面活性剂和典型的药物,研究了表面活性剂和药物对聚(*L*-乳酸)纤维直径尺寸和均一性的影响,发现它们的加入有利于减小纤维直径以及提高直径的均一性。他们同时还研究了聚(*L*-乳酸)药物复合纤维的药物释放性能,随着纤维的降解药物连续的释放,因此它具有较好的临床应用前景。Ignatious 和 Baldoni^[51]将药物和支载材料一同溶于电纺溶液中,电纺得到用于药物复合方面的聚合物纳米复合纤维,它可被设计为具有快速释放、延迟、缓释等特点。

2.5 其他应用

由于电纺聚合物纳米纤维具有直径小、比表面积大的特点,将其制成过滤材料,将具有较高的过滤效率和较低的空气阻力^[52]。用特殊聚合物电纺得到的纳米纤维或在纤维上附着一些选择性的介质制得的过滤膜,可用于分子过滤,例如用在检测和过滤化学和生物武器方面^[53]。

电纺聚合物纳米纤维还可用来制作功能传感器,高比表面积有助于提高它的灵敏度。新型的化学和生化传感器的传感界面可用聚(乳酸-co-羟基乙酸)电纺纳米纤维膜制作^[54]。最近, Lee 等^[55]还设计合成了一种基于荧光的光学传感器,其具有较高的灵敏度。

电纺聚合物纳米纤维在模板合成法中可作为模板来合成不同材料的纳米管^[56,57]。另外,它们在防护材料、化妆品等领域也有很好的应用前景^[3]。

3 展望与挑战

电纺法是制备聚合物基多功能化、高性能纳米纤维的一种简单而有效的方法,电纺聚合物纳米纤维有着非常广泛的应用前景。但这种方法虽然已经出现了将近 70 年,仍不是很成熟和完善。目前,对电纺过程的认识、电纺聚合物纳米纤维的性能以及纳米纤维特别是复合纳米纤维的开发应用还非常有限^[3],需要对以下三个方面进行更加深入的研究:

- (1) 利用电纺原理,通过改善实验装置和控制电纺参数,得到尺寸均一、连续、缺陷可控及规则排列的聚合物纳米纤维;
- (2) 对单根纤维的机械性能、电磁学性能及其他一些性能的测试及优化;
- (3) 在了解了电纺过程和电纺聚合物纳米纤维性能的基础上,开发出具有特殊功能的纳米纤维材料,实现纳米纤维的实用化。

致谢 本文得到中国科学院化学研究所有机固体开放实验室基金资助,万梅香研究员对本文的修改提出诸多宝贵意见,在此一并表示谢意。

参考文献:

- [1] 徐军. 电镀与涂饰, 2001, 20(6): 52~61
- [2] Huang Z M, Zhang Y Z, Kotaki M, Ramakrishna S. Compos Sci Technol, 2003, 63: 2223~2253
- [3] Ondarcuhu T, Joachim C. Europhys Lett, 1998, 42(2): 215~220
- [4] Feng L, Li S, Li H, et al. Angew Chem Int Ed, 2002, 41(7): 1221~1223

- [5] Martin C R. Chem Mater, 1996, 8: 1739 ~ 1746.
- [6] Ma P X, Zhang R. J Biomed Mat Res, 1999, 46: 60 ~ 72.
- [7] Liu G J, Ding J F, Qiao L J, et al. Chem-A European J, 1999, 5: 2740 ~ 2749.
- [8] Whitesides G M, Grzybowski B. Science, 2002, 295: 2418 ~ 2421.
- [9] Bognitzki M, Wendorff JH, Greiner A. Polym Prepr, 2000(82): 115 ~ 116.
- [10] Buer A, Ughoe S C, Warner S B. Textile Res J, 2001, 71: 323 ~ 328.
- [11] Christopher D, Liu X, Ziegler D, Wang X Y, et al. Nano Lett, 2003, 3(2): 143 ~ 147.
- [12] Frenot A, Chronakis I S. Curr Opin Colloid and Interface Sci, 2003, 8: 64 ~ 75.
- [13] Fomhals A, USP 1,975,504, 1934.
- [14] Baumgarten P K. J Colloid Interface Sci, 1971, 36: 71 ~ 79.
- [15] Bognitzki M, Frese T, Steinhart M, et al. Polym Eng Sci, 2001, 41: 982 ~ 989.
- [16] Reneker D H, Chun I. Nanotechnology, 1996, 7: 216 ~ 223.
- [17] Fong H, Reneker D H. Electrospinning and formation of nanofibers, Salem D R, editor. Structure formation in polymeric fibers. Munich: Hanser, 2001, p. 225 ~ 246.
- [18] Boland E D, Wnek G E, Simpson D G, et al. Macromol Sci Pur Appl Chem, 2001, A38(12): 1231 ~ 1243.
- [19] Matthews J A, Wnek G E, Simpson D G, Bowlin G L. Biomacromolecules, 2002, 3(2): 232 ~ 238.
- [20] Li D, Wang Y L, Xia Y N. Nano Lett, 2003, 3(8): 1167 ~ 1171.
- [21] Berry J P, USP 4965110, 1990.
- [22] Doshi J, Reneker D H. J Electrostatics, 1995, 35(2-3): 151 ~ 160.
- [23] Koski A, Yim K, Shivkumar S. Mater Lett, 2004, 58: 493 ~ 497.
- [24] Casper C L, Stephens J S, Tassi N G, et al. Macromolecules, 2003, 36: 121 ~ 126.
- [25] Young Jun Ryu, Hak Y K, et al. Eur Polym J, 2003, 39: 1883 ~ 1889.
- [26] Liu H Q, Hsieh Y L. J Polym Sci, Part B: Polym Phys, 2002, 40: 2119 ~ 2129.
- [27] Deitzel J M, Kleinmeyer J, Harris D T. Polymer, 2001, 42: 261 ~ 272.
- [28] Demir M M, Yilgor I, Yilgor E, Ertan B. Polymer, 2002, 43: 3303 ~ 3309.
- [29] Fong H, Chun I, Reneker D H. Polymer, 1999, 40: 4585 ~ 4592.
- [30] Guan H Y, Shao C L, Chen B, et al. Inorg Chem Commun, 2003, 6: 1409 ~ 1411.
- [31] Guan H Y, Shao C L, Wen S B, et al. Mater Chem Phys, 2003, 82: 1002 ~ 1006.
- [32] Guan H Y, Shao C L, Wen S B, et al. Inorg Chem Commun, 2003, 6: 1302 ~ 1303.
- [33] Viswanathamurthi P, Bhattarai N, Kim H Y, et al. Chem Phys Lett, 2003, 374: 79 ~ 84.
- [34] Gong J, Shao C L, Yang G C, et al. Inorg Chem Commun, 2003, 6: 916 ~ 918.
- [35] Viswanathamurthi P, Bhattarai N, Kim H Y, Lee D R. Scripta Materialia, 2003, 49: 577 ~ 581.
- [36] Li D, Xia Y N. Nano Lett, 2003, 3(4): 555 ~ 560.
- [37] Wang Y, Serrano S, Santiago-Aviles J J. Synth Met, 2003, 138: 423 ~ 427.
- [38] Dror Y, Salalha W, Rafail L. Langmuir, 2003, 19: 7012 ~ 7020.
- [39] Ko F K, Khan S, Ali A, et al. Structural Dynamics and Materials Conference, 2002, 3: 1779 ~ 1787.
- [40] Kim J S, Reneker D H. Polym Compos, 1999, 20(1): 124 ~ 131.
- [41] Bergshoeff M M, Vancso G J. Adv Mater, 1999, 11(16): 1362 ~ 1365.
- [42] 黄维垣, 闻建勋. 高技术有机高分子材料进展. 北京: 化学工业出版社, 1994: 189 ~ 190.
- [43] Diaz-de-Leon M J. Electrospinning nanofibers of polyaniline and polyaniline/(polystyrene and polyethylene oxide) blends. National Conference of Undergraduate Research, Lexington: University of Kentucky; 2001.
- [44] MacDiamid A G, Jones W E, Norris I D, et al. Synth Met, 2001, 119: 27 ~ 30.
- [45] Norris I D, Shaker M M, Ko F K, MacDiamid A G. Synth Met, 2000, 114: 109 ~ 114.
- [46] Ziegler D, Senecal K J, Dew C, Samuelson L. Electrospun fibrous membranes of photovoltaic and conductive polymer. J Textile Apparel, Technol Manage 2001, vol. 1. Special issue: The Fiber Society Spring 2001 Conference, Raleigh NC.
- [47] Xu C Y, Inai R, Kotaki M, Ramakrishna S. Biomaterials, 2004, 25: 877 ~ 886.
- [48] Min B M, Lee G, Kim S H, et al. Biomaterials, 2004, 25: 1289 ~ 1297.
- [49] Jin H J, Chen J S, Karageorgiou V, et al. Biomaterials, 2004, 25: 1039 ~ 1047.
- [50] Zeng J, Xu X Y, Chen X S, et al. Controlled Release, 2003, 92: 227 ~ 231.
- [51] Ignatious F, Baldoni J M. PCT/US01/02399, 2001.
- [52] Tsai P P, Schreuder-Gibson H, Gibson P. J Electrostatics, 2002, 54: 333 ~ 341.
- [53] Graham S, "Smart" silicon dust could help screen for chemical weapons, Scientific American 2002; 3.

[54] Kwoun S J, Lec R M, Han B, Ko F K. Polymer nanofiber thin films for biosensor applications, Proceedings of the IEEE 27th Annual Northeast Bioengineering Conference, 2001. p. 9 ~ 10.

[55] Lee S H, Ku B C, Wang X, et al. Mat Res Soc Symp Pro, 2002, 708: 403 ~ 408.

[56] Hou H Q, Jun Z, Reuning A, et al. Macromolecules, 2002, 35(7): 2429 ~ 2431.

[57] Bognitzki M, Hou H, Ishaque M, et al. Adv Mater, 2000, 12(9): 637 ~ 640

Electrospinning Method and its Applications in Polymer Nanofibers

LU Zheng-xian, YAN Wei *

(School of Environmental and Chemical Engineering , Xi'an Jiaotong University , Xi'an 710049, China)

Abstract: This paper introduces the electrospinning process and reviews the parameters which influence the process and the applications of electrospun polymer nanofibers briefly. Research trends and challenges in the field of electrospun polymer nanofibers are also proposed.

Key words: Electrospinning; Electrospun nanofibers; Polymer and conducting polymer

《重要通知》

《高分子通报》是中国化学会主办的学术刊物, 面向大专院校、科技人员, 综合报道高分子学科动态。其内容涉及学术成就、发展动向、科技成果、教学经验和国内外信息。《高分子通报》是我国高分子界学者开展学术交流的重要园地。

因为工作需要, 我刊 2005 年发行工作将有重大变化, 由原廊坊邮局改在北京邮局发行, 邮发代号由原来的 18— 109 改为 80— 294, 原邮发代号不再使用。请读者订阅时注意。

为了加快稿件刊登周期, 我刊在 2005 年扩版, 由原来的 96 页增至到 112 页。在邮局漏订的作者, 可在我刊编辑部订阅。16 元 / 期, 全年 96 元(我刊为双月刊)。

从 2005 年起, 《高分子通报》接受电子投稿, 邮箱地址为: gztb @ccas. ac. cn。

漏订的读者可在编辑部补订。

编辑部地址为: 北京中关村北一街 2 号《高分子通报》编辑部(邮编: 100080), 电话: 010— 62588926。

《高分子通报》编辑部