

静电纺丝制备聚氧化乙烯复合纳米纤维的研究进展

杨海贞¹, 徐 熠¹, 蔡志江^{1,2*}

(1. 天津工业大学纺织学院, 天津 300387; 2. 先进纺织复合材料教育部重点实验室,
天津工业大学, 天津 300387)

摘要:聚氧化乙烯(PEO)是一种多功能的水溶性聚合物,因其良好的水溶性、低毒性、容易制备等优点而广泛应用于各个领域。本文综述了近年来国内外静电纺丝制备聚氧化乙烯复合纳米纤维的研究现状,重点介绍了CS/PEO复合纳米纤维、PANi/PEO复合纳米纤维、SA/PEO复合纳米纤维、Cellulose/PEO复合纳米纤维、MEH-PPV/PEO复合纳米纤维的研究进展及其在传感器、组织工程支架、过滤材料、医学领域的外伤敷料、电磁屏蔽材料领域的应用,分析了其潜在的应用领域,展望了聚氧化乙烯复合纳米纤维的发展前景。

关键词:静电纺丝; 聚氧化乙烯; 纳米纤维; 复合

引言

静电纺丝法是一种高效制备纳米纤维的方法,所制备的纳米纤维具有直径小、比表面积大、孔隙率高、纤维均一性好等优点。目前,关于聚合物通过静电纺丝法成功制备纳米纤维的报道很多,关于静电纺纳米纤维及其应用研究也成为了热点。静电纺纳米纤维可以应用于生物传感器、生物医学领域、组织工程支架、过滤材料、电磁屏蔽材料、药物传递系统^[1~4]等领域。本文主要回顾了近年来国内外静电纺丝制备聚氧化乙烯复合纳米纤维的研究现状,并对其未来的发展进行了展望。

1 聚氧化乙烯及其纺丝性能

聚氧化乙烯(PEO)是一种无毒的、可生物降解的、热塑性的水溶性聚合物。由于PEO具有良好的水溶性、低毒性、优异的溶液流变性、与有机溶剂的结合作用、容易制备等优点,因此,PEO可以应用于多种领域,包括医药工业、轻工纺织、农业、材料加工等领域。

静电纺丝法是一种高效制备纳米纤维的方法,但很多有机低分子聚合物、某些无机电解质通过静电纺丝法制备纯纳米纤维非常困难。由于PEO具有纺丝性能好、分子量变化范围广的优点,而且聚合物共混改性能够结合各种聚合物的优点,改善纤维的综合性能。因此,PEO可以和有机低分子聚合物、无机电解质形成混合溶液,进而提高溶液的纺丝性能。

2 静电纺丝法制备 PEO 复合纳米纤维

2.1 CS/PEO 复合纳米纤维

壳聚糖(CS)是一种多功能、可生物降解的聚合物。由于CS溶解度小、溶液粘度高、机械性能差并显示阳离子电解质的特性,使得CS溶液纯纺极具挑战性^[5~7]。因此,在电纺过程中,CS与PEO混合通过氢键反应提高CS分子链的柔韧性和流动性来制备纳米纤维。

Pakravan等^[8,9]电纺制得直径在60~80nm的CS/PEO复合纳米纤维。结果发现,CS和PEO之间

10.14028/j.cnki.1003-3726.2015.07.005

收稿:2014-11-06;修回:2015-01-26;

基金项目:天津市自然科学基金(11JCYBJC02500);

作者简介:杨海贞(1989—),女,硕士,主要研究方向为功能非织造材料开发与应用;

* 通讯联系人,E-mail:596507269@qq.com.

的氢键提高了溶液的可纺性。适中温度(40~70℃)有助于稳定射流和提高溶液的可纺性,使较高含量(高达90%(wt))的CS溶液可以电纺。实验还发现,当CS含量增加,纤维直径显著减少,原因是CS含量增加导致溶液的粘度降低、导电率增加。Su等^[10~12]进而发现,在CS/PEO溶液中加入0.4%(wt)~1.6%(wt)的NaCl或KCl,所得纤维伴随着无机盐的再结晶(如图1所示)。然而,加入合适量(0.8%(wt))的CaCl₂或FeCl₃,纤维几乎无缺陷,直径约为200nm。他们还发现,通过溶解除去PEO可以得到多孔结构的CS纳米纤维。而且,含有紫杉醇(0.1%(wt))的纳米纤维可以抑制细胞吸附、增殖,表明透明质酸(HA)/CS纤维可以有效控制紫杉醇的释放,适用于前列腺癌术后化疗。红外光谱和流变分析结果表明,金属离子降低了溶液的粘度(45%~60%),增强了CS和PEO之间的氢键反应。此外,纳米纤维对重金属离子的吸附是一个自发吸热过程,其对铅、铜、镉和镍的吸附效果为铅(II)<镉(II)<铜(II)<镍(II)。

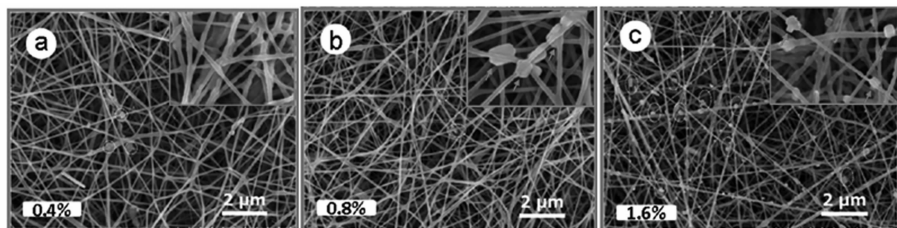


图1 含有NaCl的静电纺纳米纤维SEM图像

(a)0.4%;(b)0.8%;(c)1.6%

Figure 1 SEM images of electrospun nanofibers in the presence of NaCl

(a)0.4%;(b)0.8%;(c)1.6%

聚合物通过电纺得到含银纳米颗粒(AgNPs)的纤维具有优异的抗菌活性,在生物医学领域具有广泛的使用潜力。Fouda等^[13]成功获得直径为50nm~300nm的AgNPs/CS/PEO抗菌纳米纤维。研究发现,AgNPs的直径为12~18nm,并且AgNPs的存在会严重影响纤维直径,这是由于AgNPs增加了纤维导电性的缘故。实验发现,被转换成零价银原子的数量随老化时间的增加而增加。此外,复合纳米纤维具有比纯AgNPs更好的抗菌活性,强度约为AgNPs的2倍,可用于抗菌伤口敷料。Toskas等^[14]电纺出CS/PEO/SiO₂复合纳米纤维,通过小鼠成骨细胞在纤维上的吸附和增殖来评定其生物相容性。结果发现,纳米纤维可以促进小鼠成骨细胞的粘附、增殖,表明该纤维具有良好的细胞相容性。他们还发现,复合纳米纤维呈芯-壳结构,芯为CS/PEO,壳为SiO₂。当CS(PEO)/SiO₂的质量比为50/50,纤维直径为182±16nm。由于纤维中的CS可以显著提高其对血清蛋白的吸收,表明其适用于再生医学和骨组织工程领域。

Han等^[15]将甲氧基聚乙二醇-接枝-壳聚糖(PEG-g-CS)和PEO共混电纺出抗菌纳米纤维。实验发现,PEG-g-CS水溶液不能静电纺丝,但添加少量PEO后,不需要添加任何酸或有机溶剂就可以纺成纳米纤维。当PEG-g-CS/PEO的质量比从4/1到1/2,可以纺成均匀的超细纤维。当PEG-g-CS/PEO的质量比为某一定值,甚至可以纺成具有芯-壳结构的复合纳米纤维。将纳米纤维作为伤口敷料进行体内实验,通过与戊二醛交联来提高其抗水性能。结果发现,纤维由无序沉积状变为交联的网状结构,因其交联点增多从而提高了其强度,而伸长率降低。此外,交联纳米纤维在水环境下可以保持纤维形态,并且能够有效地加快伤口愈合,说明其有望应用在伤口敷料和药物传递系统领域。

CS作为一种可生物降解的天然高分子抗菌剂,有利于制备伤口敷料。Rieger等^[16]采用静电纺丝法制备了CS/肉桂醛(CA)/PEO复合纳米纤维。研究表明:CS/CA(0,0.5%,5.0%)/PEO纳米纤维的直径分别为55±8nm、52±9nm、38±9nm。固态核磁共振结果表明,含有5.0%CA的纳米纤维比含有0.5%CA的纳米纤维释放出更多的CA蒸汽。细胞毒性研究表明,随着CA的快速释放,CS表现出对大肠杆菌和绿脓杆菌更高的抗菌活性,这表明理想的伤口敷料主要受CA含量的影响,合适量的CA可以

最大程度地降低细胞毒性和提高其抗菌活性。因此,其可用于根除假单胞菌感染方面。

综上所述,CS 纳米纤维一般都存在抗水性较差(如在水中易溶解或溶胀)的问题,严重影响了其使用的领域范围。同时,CS 的湿态力学性能不好,不能满足组织工程支架材料的力学性能要求。鉴于以上问题,可以通过优化 CS 纺丝工艺,使用合适的交联剂(如戊二醛或 CaCl_2 溶液)对 CS 纳米纤维进行交联,进而改善交联后纳米纤维的力学性能和生物相容性。

2.2 PANi/PEO 复合纳米纤维

聚苯胺(PANi)是一种优良的结构型导电聚合物,掺杂后导电性能提高,而且 PANi 纤维具有高比表面积和多孔结构,可作为金属粒子催化剂的载体。鉴于 PANi 纯纺比较困难,加入易成纤的 PEO 来改善纳米纤维膜质量。在制备 PANi 纤维时,可以通过加入 PEO 来提高 PANi 溶液中分子之间的相互作用力,进而提高溶液的纺丝性能。

多壁碳纳米管(MWNTs)具有优异的电导率,是最有吸引力的导电聚合物之一。由于 PANi 的导电性不佳以及在溶液中的稳定性不好,影响了其应用领域。将 MWNTs 添加到 PANi 中可以提高纤维的导电性和机械性能。Shin 等^[17,18]以氯仿为溶剂,利用转鼓静电纺丝法制成 PANi/PEO/MWNTs 导电纳米纤维。电镜图像表明,通过直接氟化法对表面进行改性可使 MWNTs 在纤维中对齐生长,改善了其在纤维中的粘合性和分散性。添加 1%(wt)的 MWNTs 后,纤维光滑均匀,直径为 10~20nm。实验发现,纤维的导电性在电压较高(9kV)时得到明显提升,这可能是由导电聚合物内部 MWNTs 自身发热造成的,说明这种自身发热现象可以显著增加纤维的导电性。他们还发现,氟化处理、MWNTs 的取向提高了纤维的电磁屏蔽效能,原因是氟化处理增强了 MWNTs 和纤维之间的电子供体-受体反应。添加氟化处理的 MWNTs 后,纤维的电导率增加到 $4.8 \times 10^3 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$,表明其可用于制造电磁屏蔽材料。

TiO_2 作为无机抗菌剂,具有良好的稳定性、光催化活性和抗菌性。Neubert 等^[19]通过静电纺丝技术得到樟脑磺酸(CSA)/PANi-PEO 复合纳米纤维。研究表明:复合纳米纤维降低了 TiO_2 纳米粒子的流失(<5%)。当 PANi 含量为 12%(wt),纳米纤维具有更好的导电性,纤维光滑均匀、无珠粒。添加 TiO_2 纳米粒子后,纳米纤维可以显著净化毒物 2-氯乙基苯基硫醚(CEPS),其原因是 TiO_2 纳米粒子分散均匀以及 TiO_2 提高了纳米纤维的光催化活性和吸附净化能力,表明该纤维可用于催化过滤膜材料。

Lin 等^[20]成功将聚乙烯醇缩丁醛(PVB)、PANi 与 PEO 在 *N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)中电纺成 PANi/PEO/PVB 复合纳米纤维。研究发现,有珠结的纳米纤维对电极的粘合性有很大的改进空间,这反过来增强了其感知特性。通过调整纺丝液的配置来减少纤维的珠结现象,从而增加电极的粘合性。实验还发现,PEO 的加入显著提高了 PANi 纤维的亲水性,其原因是纺丝液具有良好的湿度感应性。添加少量 PEO 后,基于有珠结的 PANi 纤维制作的湿度传感器具有高灵敏度、快速响应和较小滞后的优点。

由此可见,PANi 纳米纤维具有比表面积大、孔隙率高、导电通路独特的优点,极大地增强了 PANi 纤维的应用性能,有助于扩大 PANi 纤维的应用领域。尤其是对于超级电容器用 PANi 材料,PANi 纤维提高了它的电化学电容性能,使其导电性、比容量、循环稳定性得到改善。

2.3 SA/PEO 复合纳米纤维

海藻酸钠(SA),一种天然多糖,具有稳定性、亲水性、无毒性 and 生物可降解性。由于 SA 溶液较难进行电纺,而且电纺成的纤维粗细、脆性、弹性和强力不够理想,严重限制了其广泛使用。通过 PEO 中—OH 和 SA 中— COO^- 形成强的氢键,使分子内与分子间的排斥力变弱,从而提高溶液的可纺性和纤维的柔韧性。但是纺丝过程中仍然存在不安全因素,如电火花、击穿现象等。

Jeong 等^[21]用细胞粘附肽(RGDS)对 SA 进行改性,并将改性 SA 和未改性 SA 与 PEO 分别进行复合电纺。研究表明,当溶液浓度为 0.2% 和 0.4%,纤维的形貌最好。改性 SA/PEO 纳米纤维的直径为 175nm,未改性 SA/PEO 纳米纤维的直径为 150nm。将成纤维细胞培养在纳米纤维上来研究其对纤维的粘附性。结果发现,成纤维细胞能够在改性 SA/PEO 纤维上良好地粘附、扩散和增殖,而在未改性纤维上几乎不粘附、增殖。Bonino 等^[22,23]也研究了成纤维细胞对纳米纤维的粘附性。研究发现,SA/PEO 纳米纤

维具有无毒性,有效地提高了细胞的粘附、扩散和增殖,表明其可应用于组织工程支架材料。当 SA/PEO 的质量比大于 80/20,均可以纺成纤维。而且,复合纳米纤维具有芯-壳结构和尖锐界面,SA 为芯、PEO 为壳,芯和壳之间界限分明。他们还发现,溶液的表面张力对溶液能否静电纺丝影响最大。将 SA/PEO 纳米纤维与 CaCl_2 溶液交联可以提高其抗水性能。

综上所述,由于 SA 纳米纤维具有止血功能、促进伤口愈合等优异性能,非常适合应用在治疗烧伤、顽固性溃疡、器官移植、组织修复等领域。但它所形成的纤维却存在很大的不足,如纤维脆性较大、力学性能较差、性能单一及生物降解速率不好控制。需要与其它聚合物共混和改性(如化学交联)来避免其不足,进而提高其力学性能,使其获得更多优异性能。利用复合和共混的方法可以有效地结合不同材料的优异性能,在保持自身优良性能的同时改善纤维的力学性能,进而扩大其在生物医学领域的应用效率,有助于开拓 SA 纳米纤维的应用领域。

2.4 Cellulose/PEO 复合纳米纤维

羟丙基纤维素(HPC)以其可生物降解性而著称,然而纯 HPC 溶液较难电纺,通过与 PEO 复合电纺,开拓了其在生物医学和组织工程领域的应用。如 Francis 等^[24]电纺成载银 HPC/PEO 复合纳米纤维。研究表明:复合纳米纤维具有多孔结构,无珠串,直径为 $255 \pm 65 \text{ nm}$,纤维中 AgNPs 呈球形分布,直径为 $5 \sim 8 \text{ nm}$ 。实验中还发现,载银 HPC/PEO 纳米纤维的拉伸强度约为 HPC/PEO 纳米纤维的 5 倍。

Zhou 等^[25,26]通过静电纺丝系统制备了直径在 $100 \sim 240 \text{ nm}$ 的纤维素纳米晶体(CNC)/PEO 复合纳米纤维,然后与季戊四醇三丙烯酸酯(PETA)交联,并研究了照射时间和 CNC 含量对交联过程的影响。实验发现,40min 是紫外线引发交联过程最佳照射时间,交联前后纤维膜的性能有较大差异。当 CNC 含量增加到 10%(wt),交联纳米纤维的直径更细、更均匀,溶胀性和机械性能也显著改善。交联的 CNC/PEO 纳米纤维的最大拉伸应力和杨氏模量比未交联的 PEO 分别增加了 377.5%和 190.5%,比交联的 PEO 分别增加了 76.5%和 127.4%,主要是由 CNC/PEO 交联互穿网络膜的协同效应造成的。由于 PEO 电解质在温度高于 200°C 时仍然保持稳定,因此,其可以安全地应用在锂电池领域。

纤维素(Cellulose)纳米纤维兼具纤维素原料的优点和纳米纤维的优异性能,并且具有直径较小、纤维性能不受水解影响的特点,有助于制造环保型功能材料。然而,纤维素大分子之间的氢键导致其溶解性不好,使得直接通过静电纺丝法很难获得纤维素纳米纤维。因此,通常先对纤维素衍生物进行电纺得到纤维,再将其水解获得纤维素纳米纤维。

2.5 MEH-PPV/PEO 复合纳米纤维

聚对苯乙炔(PPV)类导电聚合物有着良好的光电特性,聚[2-甲氧基-5-(2'-乙基己氧基)-对亚苯基亚乙烯基](MEH-PPV)是 PPV 的烷氧基取代衍生物,易溶于有机溶剂,保留了 PPV 优良的光电特性,是目前聚合物光电子领域最有吸引力的电子聚合物之一。

Zhu 等^[27]将 MEH-PPV 与 PEO 混合电纺成 MEH-PPV/PEO 纳米纤维,并对其荧光特性进行研究。研究发现,该纤维没有任何偏振波依赖性。当 MEH-PPV 浓度降低,纤维的发光频带在 630nm 处蓝移 45nm,而发光主峰在 590nm 处蓝移 15nm,MEH-PPV 的发射频带在 595nm 和 630nm 处发生蓝移,MEH-PPV 定型区的低能量发射出现了蓝移,表明 MEH-PPV 聚合物链很少凝集,这些特性使其有望应用在化学传感器和晶体管方面。Cho 等^[28]采用类似的方法电纺成 ZnO/MEH-PPV/PEO 纳米纤维。实验发现,纤维出现了明显的光致发光现象,而且,ZnO 与 MEH-PPV 的复合比例是影响纤维光致发光特性的主要因素。当 ZnO 浓度增加,峰值先红移后蓝移。当 ZnO 浓度较低,ZnO 的分散诱导 MEH-PPV 聚集,导致峰值红移。当 ZnO 浓度较高($>50\%$)时,导致峰值蓝移,表明其更适合应用在太阳能电池和发光二极管器件方面。

该纤维保留了荧光材料 MEH-PPV 的优良特性,具有优异的发光特性、均匀的纤维直径和较好的纤维形貌,在纳米光电器件方面非常有希望替代纯 MEH-PPV 纳米纤维,从而广泛应用于太阳能电池或化

学传感器等方面。

2.6 PEO 与其它聚合物复合纳米纤维

Ignatova 等^[29]采用静电纺丝工艺制备了聚乙烯吡咯烷酮(PVP)/PEO 纳米纤维。实验表明,由于组合物和所施加的电场强度(AFS),纤维直径为 150~470nm;当 PEO 含量增加,纤维直径变大;而当 AFS 变高,纤维直径不仅变大,粒径分布也变宽。Uyar 等^[30]用环糊精(CD)将 PEO 官能化,电纺制成 PEO/CD 纳米纤维。研究发现,不同量的 PEO(3%,3.5%,4%(w/v),相对于溶剂)和 CD(25%和 50%(w/w),相对于 PEO)水溶液可以制成无珠纤维(如图 2 所示)。CD 可以使低浓度聚合物电纺成无珠纤维,主要由于 PEO/CD 溶液具有较高的导电率和粘度。X 射线衍射光谱显示没有明显的 CD 衍射峰,说明 CD 分子在聚合物中分散良好,没有形成晶体聚集体。

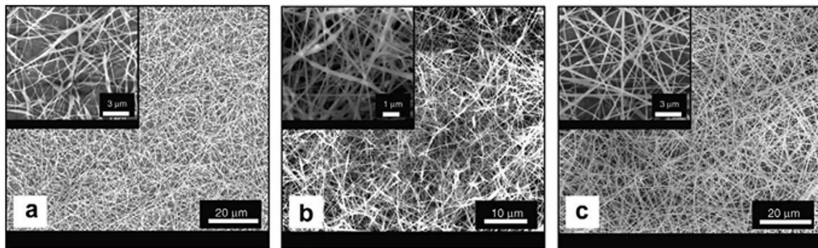


图 2 不同纺丝浓度下制备的 PEO((w/v),相对于溶剂)纳米纤维 SEM 照片
(a)3%;(b)3.5%;(c)4%

Figure 2 SEM photos of the nanofibers made from different PEO concentrations
(a)3%;(b)3.5%;(c)4%

无机抗菌剂具有优异的抗菌性,尤其是银离子的抗菌效果最好。Tijing 等^[31]采用双喷头电纺系统得到 AgNPs/PEO/聚氨酯(PU)抗菌纳米纤维。X 射线光谱和紫外光谱表明,AgNPs 存在于纳米纤维的表面,等离子体激元共振频带的峰值在 415nm 和 425nm 处。电镜图像表明,纳米纤维具有高度多孔结构,AgNPs 的粒径为 6~90nm。此外,纳米纤维具有良好的抗菌活性,其原因是抗菌纳米纤维中游离出的银离子具有抗菌作用,表明其可用于抗菌组织支架和伤口愈合方面。Kim 等^[32]成功将 Ti(OH)_n、铂(Pt)纳米颗粒和 PEO 溶液进行电纺,然后高温煅烧获得 Pt 负载的 TiO₂ 纳米纤维。结果表明,煅烧后的纤维直径为 200~900nm,比 PEO/Ti(OH)_n/Pt 纳米纤维的直径粗,主要由于 PEO 降解和 Ti(OH)_n 经氧化变为 TiO₂。煅烧后的纳米纤维的催化活性比本体催化剂高 5~7 倍,这种改进是由纤维的表面积比本体催化剂大所造成的,表明其可用于燃料电池材料。

Sullivan 等^[33]将乳清蛋白分离物(WPI)和 PEO 溶液电纺成 WPI/PEO 复合纳米纤维。实验发现,当 WPI:PEO 的比率为 3:1(w/w%),纤维直径为 312~690nm。红外光谱表明,当 WPI 浓度和 PH 值变化, WPI 二级结构发生一些变化,如 WPI 浓度增加,α 螺旋增加和 β 折叠减小;pH 值由 7.5 减少到 2,β 折叠减小,α 螺旋增加。X 射线光电子能谱证实 WPI 存在于纳米纤维的表面。当温度高于 PEO 熔点(60℃),纳米纤维仍然保持纤维形态。由于纤维在水中溶胀并保持纤维质量,说明其有望应用于再生医学领域。

3 结论和展望

PEO 复合纳米纤维作为一种多功能材料受到人们的广泛关注和研究。虽然已经有大量文献对它进行了报道,但关于它的报道还处于初级阶段。PEO 复合纳米纤维化学毒性小、生物相容性好,在组织工程支架、过滤材料等领域都有广泛的应用。本文重点介绍了 CS/PEO 复合纳米纤维、PANi/PEO 复合纳米纤维、SA/PEO 复合纳米纤维、Cellulose/PEO 复合纳米纤维、MEH-PPV/PEO 复合纳米纤维的研究进展及其在传感器、过滤材料、生物医学领域的应用,今后主要大力开发复合纳米纤维在组织工程支架、

电磁屏蔽材料和药物传递系统领域的研发。然而,静电纺纳米纤维仍然存在许多问题,例如,如何利用流体动力学对静电纺丝工艺进行优化、纳米纤维的质量控制、大批量生产等。随着静电纺丝技术的不断发展,PEO 复合纳米纤维的开发和应用必将进入一个新时期。

参考文献:

[1] Huang Z M, Zhang Y Z, Kotaki M, Ramakrishna S. Compos Sci Technol, 2003, 63(15): 2223~2253.

[2] Barnes C P, Sell S A, Boland E D, Simpson D G, Bowlin G L. Adv Drug Deliv Rev, 2007, 59(14): 1413~1433.

[3] Jayakumar R, Prabaharan M, Kumar P T S, Nair S V, Tamura H. Biotechnol Adv, 2011, 29(3): 322~337.

[4] Kontogiannopoulos K N, Assimopoulou A N, Tsvintzelis I, Panayiotou C, Papageorgiou V P. Int J Pharm, 2011, 409(1/2): 216~228.

[5] Huang X J, Ge D, Xu Z K. Eur Polym J, 2007, 43(9): 3710~3718.

[6] Jia Y T, Gong J, Gu X H, Kim H Y, Dong J, Shen X Y. Carbohydr Polym, 2007, 67(3): 403~409.

[7] Li L, Hsieh Y L. Carbohydr Res, 2006, 341(3): 374~381.

[8] Pakravan M, Heuzey M C, Ajji A. Polym, 2011, 52(21): 4813~4824.

[9] Kriegel C, Kit K M, McClements D J, Weiss J. Polym, 2009, 50(1): 189~200.

[10] Su P, Wang C, Yang X, Chen X, Gao C, Feng X X, Chen J Y, Ye J, Gou Z. Carbohydr Polym, 2011, 84(1): 239~246.

[11] Aliabadi M, Irani M, Ismaeili J, Piri H, Parnian M J. Chem Eng J, 2013, 220: 237~243.

[12] Ma G, Liu Y, Peng C, Fang D, He B, Nie J. Carbohydr Polym, 2011, 86(2): 505~512.

[13] Fouda M M G, El-Aassar M R, Al-Deyab S S. Carbohydr Polym, 2013, 92(2):1012~1017.

[14] Toskas G, Cherif C, Hund R D, Laourine E, Mahltig B, Fahmi A, Heinemann C, Hanke T. Carbohydr Polym, 2013, 94(2): 713~722.

[15] Han J, Zhang J, Yin R, Ma G, Yang D, Nie J. Carbohydr Polym, 2011, 83(1): 270~276.

[16] Rieger K A, Schiffman J D. Carbohydr Polym, 2014, 113: 561~568.

[17] Shin M K, Kim Y J, Kim S I, Kim S K, Lee H, Spinks G M, Kim S J. Sens Actuators B: Chem, 2008, 134(1): 122~126.

[18] Im J S, Kim J G, Lee S H, Lee Y S. Colloids Surf A: Physicochem Eng Asp, 2010, 364(1/3): 151~157.

[19] Neubert S, Pliszka D, Thavasi V, Wintermantel E, Ramakrishna S. Mater Sci Eng B, 2011, 176(8): 640~646.

[20] Lin Q Q, Li Y, Yang M J. Sens Actuators B: Chem, 2012, 161(1): 967~972.

[21] Jeong S I, Krebs M D, Bonino C A, Khan S A, Alsberg E. Macromol Biosci, 2010, 10(8): 934~943.

[22] Bonino C A, Krebs M D, Saquing C D, Jeong S I, Shearer K L, Alsberg E, Khan S A. Carbohydr Polym, 2011, 85(1): 111~119.

[23] Ma G, Fang D, Liu Y, Zhu X, Nie J. Carbohydr Polym, 2012, 87(14): 737~743.

[24] Francis L, Balakrishnan A, Sanosh K P, Marsano E. Mater Lett, 2010, 64(16): 1806~1808.

[25] Zhou C, Wang Q, Wu Q. Carbohydr Polym, 2012, 87(2): 1779~1786.

[26] Samad Y A, Asghar A, Hashaikheh R. Renew Energy, 2013, 56: 90~95.

[27] Zhu Z, Zhang L, Smith S, Fong H, Sun Y, Gosztola D. Synth Met, 2009, 159(14): 1454~1459.

[28] Cho M Y, Cho K, Kim S. J Lumin, 2013, 134: 79~82.

[29] Ignatova M, Manolova N, Rashkov I. Eur Polym J, 2007, 43(5): 1609~1623.

[30] Uyar T, Besenbacher F. Eur Polym J, 2009, 45(4): 1032~1037.

[31] Tijing L D, Ruelo M T G, Amarjargal A, Pant H R, Park C H, Kim C S. Mater Chem Phys, 2012, 134(2/3): 557~561.

[32] Kim H, Choi Y, Kanuka N, Kinoshita H, Nishiyama T, Usami T. Appl Catal A, 2009, 352(1/2): 265~270.

[33] Sullivan S T, Tang C, Kennedy A, Talwar S, Khan S A. Food Hydrocoll, 2014, 35: 36~50.

Advances in Poly (ethylene oxide) Composite Nanofibers Prepared by Electrospinning

YANG Hai-zhen¹, XU Yi¹, CAI Zhi-jiang^{1,2*}

(1. School of Textiles, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. Key Laboratory of Advanced Textile Composite Materials of Ministry of Education,

Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Poly(ethylene oxide) (PEO) is a kind of multifunctional water-soluble polymer, widely used in various fields because of its good water solubility, low toxicity and easy preparation, etc. This paper introduces the development of PEO composite nanofibers prepared by electrospinning in recent years at home and abroad, focusing on the CS/PEO, PANi/PEO, SA/PEO, Cellulose/PEO and MEH-PPV/PEO composite nanofibers in the fields of sensors, tissue engineering scaffolds, filter materials, wound dressings, electromagnetic shielding materials. The potential applications and prospect of PEO composite nanofibers have also been described.

Key words: Electrospinning; Poly(ethylene oxide); Nanofibers; Composite