

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.05.003

多形貌聚醚砜纤维毡吸附双酚 A 的特性

魏晓慧^{1,2}, 刘铎^{1,2}, 郝丽梅², 林松², 吴金辉², 郭敏杰¹

(1. 天津科技大学化工与材料学院, 天津 300457; 2. 军事科学院卫勤保障技术研究所, 天津 300161)

摘要:以四氢呋喃和 *N, N*-二甲基甲酰胺作溶剂, 将一定浓度的聚醚砜 (PES) 通过静电纺丝获得具有串珠结构的纳米纤维毡, 并且发现通过提高制备过程中空气相对湿度可进一步获得形貌均一且无串珠结构的纳米纤维。采用比表面积与孔隙度分析仪, 扫描电镜与水接触角测量仪等对 PES 纤维毡的形貌和物理特性进行了系统表征。在相对湿度 (RH) 为 0.20 g/mL 时获得串珠状 PES 纳米纤维, 其具有不同的珠长径比。当 RH 值增加到 60% 时, 获得均匀的无珠子纳米纤维毡。此外, 在此条件下, 随着 PES 浓度的增加, 纤维的平均直径, 比表面积和累积孔容均逐渐增加。通过紫外分光光度计测定了不同 PES 纤维毡样品对双酚 A (BPA) 的吸附量及吸附速率, 发现具有更大比表面积和更好亲水性能的 PES 纳米纤维毡能够吸附更多的 BPA, 在 RH=60% 时, PES 浓度为 0.22 g/mL 的比表面积为 31.33 m²/g, 水接触角为 108°, 对 BPA 的吸附量可达 8.28 mg/g, 且吸附过程均符合准二级动力学模型。

关键词:聚醚砜; 吸附; 静电纺丝; 双酚 A

中图分类号: O633.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3539(2018)05-0012-06

Characteristic of Hierarchical Nanofiber Mats of Electrospun Polyethersulfone for Removing Bisphenol A

Wei Xiaohui^{1,2}, Liu Duo^{1,2}, Hao Limei², Lin Song², Wu Jinhui², Guo Minjie¹

(1. College of Chemical Engineering and Materials Science, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;

2. Institute of Medical Support Technology, Academy of Military Science, Tianjin 300161, China)

Abstract: Electrospinning has been widely recognized as a facile method to make fibrous nanofiber mats. Polyethersulfone (PES) nanofibers could be used as adsorption materials because of its enormous surface area. Systematic investigation revealed that nanofibers with unique bead-on-string and beadless shapes could be obtained by electrospinning under certain concentrations of PES in the mixed solvent of tetrahydrofuran : *N, N*-dimethyl formamide=1 : 3 (v/v) at different relative humidity (RH). The PES fiber mats were investigated via Brunauer-Emmett-Teller (BET), scanning electron microscope and contact angles measurements. By adjusting the concentration, hierarchical morphologies of bead-on-string PES nanofibers were obtained at RH of 0.20 g/mL, which bear different aspect ratios of beads. When RH value increased to 60%, the uniform bead-free nanofiber mats were obtained. Also, under this condition, the average diameters of the fibers, the specific surface area and cumulative pore volume all were increased gradually with the increasing of PES concentration. Furthermore, the adsorption rates for removal of bisphenol A (BPA) with different bead-free electrospun PES samples were determined. The results indicate that both the bigger BET surface area and better hydrophilic property factors contributes to improved adsorption capacity for bisphenol A as for the bead-free PES nanofiber mats. The specific surface area of PES 0.22 g/mL is 31.33 m²/g and water contact angle is 108° at RH=60%, which the capacity of adsorption can reach 8.28 mg/g. The pseudo-second model is better fitted the adsorption process.

Keywords: polyethersulfone; adsorption; electrospinning; bisphenol A

近年来,利用静电纺丝技术获得纳米级纤维的方法已引起极大的关注,与传统的熔融纺丝等方法

相比,静电纺丝法能够获得直径从微米级到纳米级纤维^[1-2],应用范围更广泛。聚醚砜 (PES) 作为一种

基金项目:天津市应用基础与前沿技术研究计划基金项目 (15 JCTPJ56600),军队科研项目 (CWS14C063 和 9140A26010115 JB94389)

通讯作者:林松,副研究员,主要从事纳米材料与功能高分子材料研究 E-mail: lynch163@163.com

收稿日期:2018-03-06

引用格式:魏晓慧,刘铎,郝丽梅,等.多形貌聚醚砜纤维毡吸附双酚 A 的特性 [J].工程塑料应用,2018,46(5):12-17.

Wei Xiaohui, Liu Duo, Hao Limei, et al. Characteristic of hierarchical nanofiber mats of electrospun polyethersulfone for removing bisphenol A[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(5):12-17.

成膜材料具有优异的吸附性能^[3-4]。将 PES 采用静电纺丝技术制备成纳米纤维,能够显著增大材料的比表面积,从而进一步提高材料的吸附性能。研究表明,在 PES 纳米纤维膜的制备中,纺丝液浓度、空气相对湿度等因素都会对 PES 纳米纤维的形态产生影响^[5]。PES 纳米纤维膜被广泛应用于纳滤、液体过滤等领域^[6-7],并可吸附胆红素、金属离子、双酚 A 等多种污染物。

Wu Keke 等^[8-9]选用四氢呋喃(THF)和 *N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)作为溶剂,利用静电纺丝技术制备的 PES 多孔纳米纤维,对胆红素表现出良好的吸附效果。孙键新等^[10]以 PES 为膜基质材料,以粒径分布较均匀的 4A 分子筛为功能颗粒,采用相转化法制备出了对 Cu^{2+} 具有较大吸附容量的膜吸附剂。邱芳等^[11]通过结合静电纺丝技术和沉淀凝胶法制备了多种不同结构的多孔超细聚醚醚纤维,并将其用于双酚 A 的吸附。S. S. Homaeigohar 等^[12]报道了利用电纺 PES 纳米纤维毡作为液体过滤膜材料的研究,以 PET 非织造布作为支撑层,PES 作为功能层。试验表明,这类膜的过滤性能高度依赖于溶液中悬浮颗粒的尺寸分布。当悬浮颗粒大于 $1\ \mu\text{m}$ 时,过滤截留的粒子主要分布在材料表面;而较小颗粒($< 1\ \mu\text{m}$)则会深入纤维内部,形成明显的滤饼层。这项研究表明此类滤膜能有效用于水中微米级别大颗粒的去除分离。G. T. Christopherson 等^[13]报道了利用层粘连蛋白包被修饰的 PES 静电纺丝纳米纤维毡,进行诱导神经干细胞增殖分化的研究。发现不同尺度的 PES 纤维如直径为 $(283 \pm 45)\ \text{nm}$, $(749 \pm 153)\ \text{nm}$ 和 $(1452 \pm 312)\ \text{nm}$ 的纤维对细胞的分化和增殖有显著的影响。K. Yoon 等^[14]报道了利用不同溶剂制备 PES 纳米纤维膜用于水处理和净化。发现采用两种处理方法可以显著提高膜的力学性能和亲水性而不影响其孔隙率和水的渗透性能。一种是通过使用混合溶剂(DMF 和 NMP)进行膜的制备,利用 NMP 不易挥发的特性会产生由溶剂引起的纤维间连接点之间的融合,以改进膜的力学性能。第二种方法是引入一种强氧化剂——过硫酸铵,通过短时氧化作用,使得膜的亲水性大大改善。

研究表明,双酚 A(BPA)会扰乱人体内的代谢过程,还可能诱发某些癌症^[15]。含 BPA 的食品接触材料在使用过程中,特别是加热时,其中残留的 BPA 可能析出到食物与饮料中,进而影响人类与动

物的正常内分泌功能,危害人类与动物的健康与生命^[16]。Cao Fuming 等^[17]将蒙脱石和 PES 复合,以进一步提高 PES 吸附能力。宫建龙等^[18-19]采用静电纺丝技术制备 BPA 分子印迹 PES 纤维膜,可以特异性识别和结合 BPA 分子。N. Bolong 等^[20]报道了中空纤维 PES 纳滤膜制备,也可用于去除 BPA。然而采用不同形貌 PES 纳米纤维去除 BPA 的研究报道较少,且对相应吸附过程缺乏系统的动力学分析。

笔者采用静电纺丝技术,通过调节溶质的浓度与空气相对湿度,制得具有不同串珠结构的纳米纤维以及纯纳米纤维毡结构。对于串珠纤维结构,研究发现其中珠状结构长径比的变化规律与纤维直径的变化存在密切关联。含有串珠结构的纤维直径越小,所得的串珠长径比越小。对于纯纤维的样品,纤维的直径和材料的初始浓度密切相关,较高的浓度可以获得更粗的纤维结构。进一步采用 BPA 作为目标吸附物分子,评价纯纤维结构 PES 纤维毡材料的吸附特性,并分别用准一级和准二级动力学模型对吸附过程进行模拟分析。相关研究对于进一步设计优化超疏水材料、过滤材料以及多孔吸附材料的制备具有潜在的借鉴意义。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PES: 3010, 德国 BASF 化学公司;

THF, DMF 及无水乙醇: 分析纯, 购自天津江天化学试剂厂;

BPA: 分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 主要设备及仪器

扫描电子显微镜(SEM): 1530VP 型, 德国 LEO 公司;

水接触角测量仪: OCA15EC 型, 德国 Data Physics 公司;

比表面积与孔隙度分析(BET)仪: ASAP 3020 型, 美国 Micromeritics 仪器公司;

紫外-可见分光光度计: UV1700 型, 日本岛津公司。

1.3 测试与表征

采用 SEM 对 PES 纤维毡的形貌进行观察。使用水接触角测量仪测定材料的水接触角。利用 BET 仪对 PES 纤维毡的比表面积与孔分布进行氮吸脱附测试, 测试前材料于 60°C 脱气 12 h。

1.4 实验步骤

(1) PES 静电纺丝纤维毡的制备。

准确称量一定量的 PES, 加至 THF 与 DMF($v:v=1:3$) 的混合溶剂中, 60°C 水浴加热搅拌 4 h, 分别获得浓度 (w/v) 为 0.20, 0.22, 0.28, 0.30 g/mL 的均质溶液, 室温静置备用。

利用静电纺丝装置进行纺丝, 装置简图如图 1 所示, 主要由高压电源、注射装置与接收装置三部分组成。吸取一定量的 PES 纺丝液于 10 mL 无菌注射器中, 采用无纺布作为接收基材, 调节注射器到无纺布之间的距离为 15 cm, 纺丝电压为 18 kV, 纺丝速率为 1 mL/h, 纺丝时间 4 h, 空气相对湿度 (RH) 分别为 20% 和 60%。静电纺丝后, 将所有的纤维毡样品在 60°C 下真空过夜干燥待用。

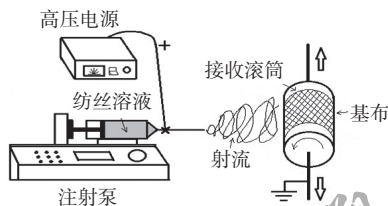


图1 静电纺丝装置示意图

(2) BPA 吸附测试。

取 10 mg BPA 溶于一定量的乙醇中, 然后用去离子水稀释, 最终定容得到 100 mg/L 的 BPA 母液。分别取 100 mg 干燥后的 PES 样品, 加至上述 10 mL BPA 溶液中, 室温振荡, 采用紫外-可见分光光度计在不同吸附时间下对溶液进行全波长扫描, 记录最大吸收峰波长处的吸光度随时间变化情况。测定 BPA 溶液浓度, 并通过下式计算 BPA 的吸附量 (Q_t , mg/g):

$$Q_t = (C_0 - C_t)V/m \quad (1)$$

其中 C_0 与 C_t 分别是 BPA 的初始浓度与最终吸附平衡浓度, mg/L; V 是吸附溶液的体积, L; m 是 PES 膜的质量, g; Q_t 为 t 时刻双酚 A 的吸附量。

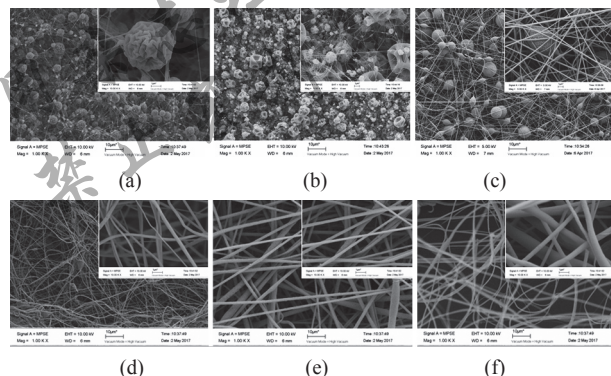
2 结果与讨论

2.1 形貌分析

实验发现, 浓度高于 0.30 g/mL 的 PES 样品在湿度为 20% 与 60% 时均无法顺利纺丝, 可能是由于溶质浓度大, 黏度过高, 大分子不易被高压电场拉伸取向所致, 因此本研究主要对其它浓度条件下 (0.20, 0.22, 0.28 g/mL) 的样品进行表征及测试。

从图 2 的 SEM 图可见, 在湿度为 20% 时, 所有 PES 样品均不是单一的纤维形态, 而是伴随出现明显的串珠状结构, 但是串珠的形貌又存在着显著的差异。随着浓度的增大, 浓度为 0.20, 0.22, 0.28 g/mL 的 PES 样品中的串珠结构依次呈现出表面有褶皱串珠 (图 2a), 到表面凹陷的串珠 (图 2b), 最后到表面相对光滑的纺锤体串珠 (图 2c)。

这三个样品整体均呈现串珠—纤维共存结构, 利用 Image J 软件, 分别从每组 SEM 图中选取 100 根纤维对直径进行统计 (图 3a) 可得, 0.20, 0.22, 0.28 g/mL 样品的纤维平均直径分别为 (144.5 ± 72.8) nm, (68.8 ± 29.4) nm 和 (198.8 ± 58.2) nm, 由此可知在空气相对湿度为 20% 时, 初始浓度的变化会对 PES 样品串珠形貌和纤维直径产生直接影响。

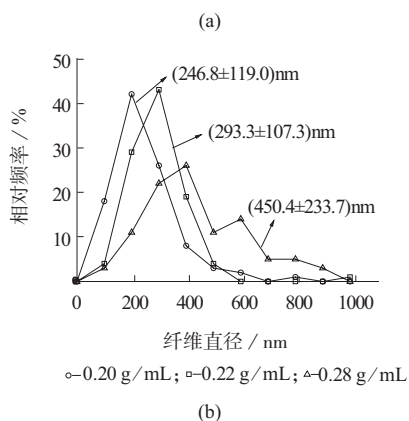
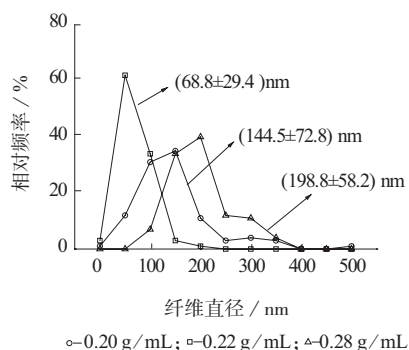


a—0.20 g/mL; b—0.22 g/mL; c—0.28 g/mL (RH=20% 时);
d—0.20 g/mL; e—0.22 g/mL; f—0.28 g/mL (RH=60% 时)

图2 不同 PES 初始浓度下静电纺丝样品的 SEM 图

当静电纺丝过程中空气相对湿度增至 60% 时, 所有样品串珠结构消失, 均呈现出均匀的纤维形貌 (图 2d、图 2e、图 2f)。可能因为 PES 溶液中的溶剂为有机溶剂, 当湿度增大时, 相同温度下, 溶剂挥发速率减慢, PES 溶液能够更多地被拉伸取向, 而不是呈液滴状滴落, 因而在相同条件下更易被拉伸成纤维。

利用 Image J 软件, 从 SEM 图像中分别选取 100 根纤维对其直径进行统计, 0.20, 0.22, 0.28 g/mL 样品的纤维平均直径随浓度的增大而逐渐增大, 依次从 (246.8 ± 119.0) nm, (293.3 ± 107.3) nm 增至 (450.4 ± 233.7) nm (图 3b)。结果表明, 不仅浓度会影响 PES 样品的形态以及纤维粒径, 空气相对湿度同样会显著影响其形态, 相同浓度下, 湿度增大 PES 会更容易在高压电场下被拉伸为纤维。



a—图 2a~图 2c 样品; b—图 2d~图 2f 样品

图 3 纤维直径统计分布图

2.2 长径比

为进一步分析材料的串珠结构和性能的关系。对材料的微结构进行了更深入的统计分析。图 5 为串珠直径 (BD)、长度 (BL) 及纤维直径 (FD) 的量取示意图,对串珠结构的尺寸统计列于表 1 中, $n=50$ 表示选取样品 50 个不同位置。

表 1 PES 纤维毡的串珠长径比 ($n=50$)

PES 浓度 / ($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	RH / %	BL / μm	BD / μm	BL / BD
0.20	20	3.3 ± 1.9	2.7 ± 1.8	1.4 ± 0.4
0.22	20	3.6 ± 2.2	3.1 ± 1.8	1.2 ± 0.2
0.28	20	5.9 ± 1.5	4.4 ± 1.8	1.5 ± 0.6

从表 1 可见,在湿度为 20% 时,三种 PES 样品具有的串珠结构均是微米级的,但具有不同的 BD、BL 及长径比 (AR)。随着浓度的增大,串珠的直径和长度都在增大,直径从 $(2.7 \pm 1.8) \mu\text{m}$, $(3.1 \pm 1.8) \mu\text{m}$ 增加到 $(4.4 \pm 1.8) \mu\text{m}$, 长度从 $(3.3 \pm 1.9) \mu\text{m}$, $(3.6 \pm 2.2) \mu\text{m}$ 增加到 $(5.9 \pm 1.5) \mu\text{m}$, 说明 PES 样品的串珠的体积趋向于更大。随着浓度的变化, AR 值从 0.20 g/mL 时的 (1.4 ± 0.4) , 下降至 0.22 g/mL 时的 (1.2 ± 0.2) , 然后又升高至 0.28 g/mL 时的 (1.5 ± 0.6) , 可见长径比变化规律与纤维直径的变化密切相关^[22]。含有串珠结构的纤维直径越小,所得的串珠长径比越小 (图 4)。主要原因可能是浓度的

变化导致改变了静电纺丝射流的表面张力,串珠的形成和存在主要是表面张力起作用,而电场产生的静电力不利于形成串珠,更利于形成纤维,两个因素相互制约平衡,从而产生了上述现象。串珠结构的存在对于进一步制备超疏水材料、过滤材料以及多孔吸附材料具有潜在更广泛意义。

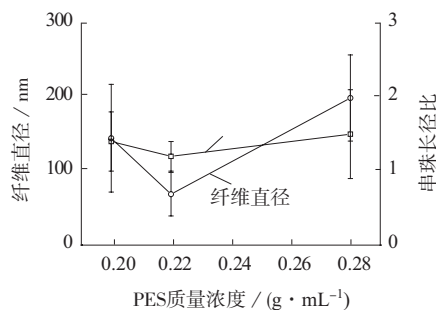


图 4 串珠结构中纳米纤维的直径以及串珠长径比的统计图

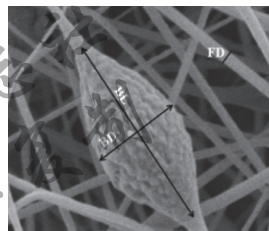
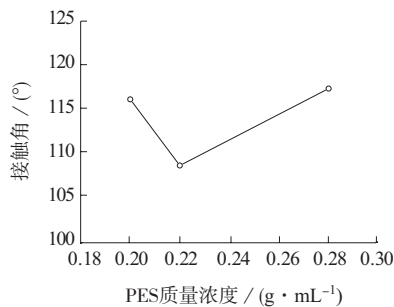


图 5 串珠直径、长度及纤维直径示意图

在此基础上,进一步测量在 RH60% 时,获得纯纤维结构 PES 样品的水接触角。在水滴稳定之后进行测量,得到数据如图 6 所示, $n=3$ 表示选取样品 3 个不同位置。

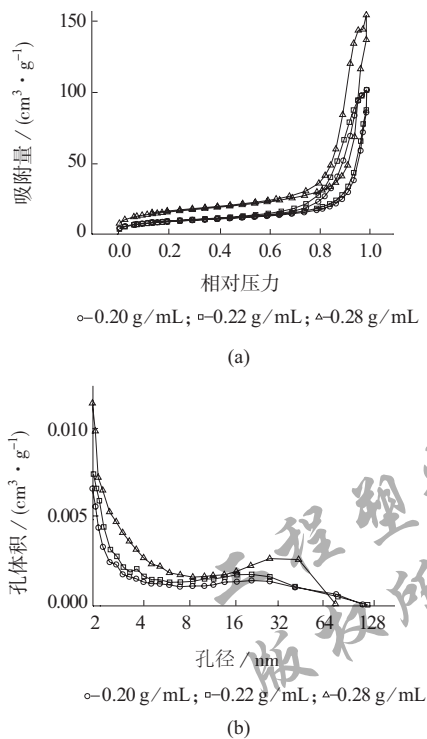
图 6 RH=60% 时不同浓度的 PES 样品的水接触角 ($n=3$)

由图 6 可以看出,所有的纯纤维样品中,初始浓度为 0.28 g/mL 样品具有最高的水接触角 (117°),与 0.20 g/mL 样品的水接触角 (116°) 接近,而 0.22 g/mL 样品的水接触角最低 (108°),亲水性较 0.20 g/mL 和 0.28 g/mL 样品更好。由此可知,所有 PES 样品均为疏水材料。材料的疏水性能除了与它的表面自由能有关之外,还与其表面的微纳米级别的粗糙结构紧密相关。PES 纳米纤维毡直径的差异以及串珠结构的不同,可能会导致表面粗糙度的不

同,从而进一步引起材料的亲疏水性能的差异。因此,调整材料表面的微纳米结构可以影响材料的疏水性能,对进一步改善制备超疏水 PES 纤维毡有重要的意义。

2.3 比表面积分析

将上述三种 PES 纯纳米纤维毡样品进行 BET 测试, RH=60% 时 PES 纤维毡的 N₂ 吸附-解吸附曲线与孔径分布曲线如图 7 所示。



a—N₂ 吸附-解吸附曲线; b—孔径分布曲线

图 7 PES 纤维毡的 N₂ 吸附-解吸附曲线及孔径分布曲线

比表面积与累积孔体积见表 2。由表 2 可知,湿度为 60% 时,0.20,0.22,0.28 g/mL 样品均具有多孔结构,并且拥有较高的比表面积。随着浓度的增大,比表面积逐渐增大,分别从 30.93 m²/g, 31.33 m²/g 增加到 54.48 m²/g, 累积孔体积逐渐从 0.093 cm³/g, 0.103 cm³/g 增大到 0.183 cm³/g。可见,在此种制备条件下 PES 纤维直径的提高有利于增大纤维毡的比表面积。

表 2 PES 纤维毡的比表面积及累积孔体积 (RH=60%)

PES 浓度 / (g · mL ⁻¹)	BET 表面积 / (m ² · g ⁻¹)	累计孔体积 / (cm ³ · g ⁻¹)
20	30.93	0.093
22	31.33	0.103
28	54.48	0.183

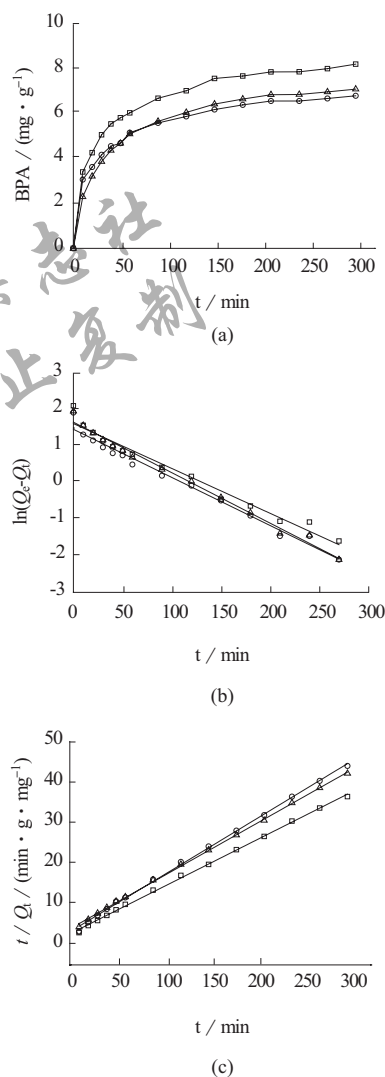
2.4 BPA 吸附动力学分析

采用紫外分光光度计对不同吸附时间下的 BPA 溶液进行全波长扫描,选取最大吸收波长为

279 nm 处的吸光度值进行吸附量的定量计算。测定湿度为 60% 时 PES 浓度为 0.20, 0.22, 0.28 g/mL 的三种纳米纤维毡对 BPA 的吸附能力 (图 8a), 并采用准一级吸附动力学模型 (1) 与准二级吸附动力学模型 (2) 来定量分析其吸附过程, 得曲线如图 8b、图 8c 所示。k₁ 和 k₂ 分别为准一级和准二级动力学速率常数, Q_e 为吸附平衡时双酚 A 的吸附量。

$$\ln(Q_e - Q_t) = -k_1 t \quad (1)$$

$$Q_t = \frac{k_2 Q_e^2 t}{1 + k_2 Q_e t} \quad (2)$$



a—PES 对 BPA 吸附曲线; b—准一级动力学模型; c—准二级动力学模型

图 8 PES 对 BPA 吸附曲线及准一级、准二级动力学模型

由图 8 可知,在湿度为 60% 时,0.20,0.22,0.28 g/mL 三种浓度条件下获得的纳米纤维,均对 BPA 表现出良好的吸附能力,这与其具有的较高的比表面积与多孔结构有关。吸附量随吸附时间延长不断增大,1 h 之前吸附速率均较快,随后速率逐渐减

慢,最终在 5 h 左右吸附趋于饱和,达到吸附-解吸附平衡。反应 5 h 时,0.28 g/mL PES 纤维毡的吸附量为 7.12 mg/g,较 0.20 g/mL 样品的 6.82 mg/g 更大,这是由于 0.28 g/mL 样品具有更大的比表面积,能够吸附更多的 BPA。有意思的是,0.22 g/mL 样品虽然比表面积较 0.28 g/mL 样品略小,但其对 BPA 的吸附量在 5 h 时为 8.28 mg/g,饱和吸附量及吸附速率在三个样品中均最大,这与其表面亲疏水性能有关。三者虽均为疏水材料,但 0.22 g/mL PES 纤维毡的水接触角为 108°,较另外两者亲水性更好,对 BPA 水溶液的亲和性更佳,因而更利于 BPA 分子在水溶液中的吸附。

为了进一步确定其动力学吸附模型,利用准一级动力学模型与准二级动力学模型对吸附过程进行模拟分析,从分析数据(表 3 和图 8b、图 8c)可以看出,0.20,0.22,0.28 g/mL 三种浓度的 PES 纤维毡对 BPA 的吸附均更符合准二级动力学模型,相关系数(R^2)均为 0.999。

表 3 PES 纤维毡对 BPA 样品的的吸附模型(RH=60%)

PES 含量 / %	准一级动力学模型		准二级动力学模型	
	$k_1 / (\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min})$	R_1^2	$k_2 / (\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min})$	R_2^2
20	0.013 17	0.979	0.138 09	0.999
22	0.012 28	0.971	0.114 68	0.999
28	0.013 82	0.989	0.128 57	0.999

3 结论

(1) 采用静电纺丝技术,选用 THF 和 DMF 混合溶剂,通过调节 PES 的浓度与空气相对湿度,制备得到含有各种串珠形貌结构及无串珠纯纤维结构的 PES 纳米纤维毡。

(2) 在湿度 60% 时, PES 浓度越大,获得的纯纤维平均直径越大, PES 纤维毡的比表面积及累积孔体积越大。且不同的 PES 样品表面疏水性存在差异。在湿度 20% 时,不同浓度下获得的 PES 存在串珠结构且形貌存在差异。

(3) PES 纤维毡对 BPA 具有良好的吸附能力。对 BPA 水溶液的吸附能力与材料的比表面积和表面亲疏水性能均有关系,比表面积越大、亲水性越好,吸附 BPA 能力越强。对吸附过程进行动力学分析,符合准二级动力学吸附模型。

参考文献

- [1] Lin Yi, Yao Yongyi, Yang Xiaozhan, et al. Preparation of poly(ether sulfone)nanofibers by gas-jet / electrospinning[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 107(2):909-917.
- [2] Sadighzadeh A, Valinejad M, Gazmeh A, et al. Synthesis of

polymeric electrospun nanofibers for application in water proof-breathable fabrics[J]. Polymer Engineering & Science, 2016, 56(2):143-149.

- [3] Huang Yunpeng, Miao Yue-E, Liu Tianxi. Electrospun fibrous membranes for efficient heavy metal removal[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(19):5 829-5 836.
- [4] Li Jie, Zhang Quanchao, Zhang Yijia, et al. Polyethersulfone nanofibers for the removal of endocrine disruptors[J]. Desalination & Water Treatment, 2011, 29(1-3):158-163.
- [5] Fashandi H, Karimi M. Evidence for the impression of phase behavior of nonsolvent / solvent / polymer ternary system on morphology of polyethersulfone electrospun nanofibers[J]. Fibers & Polymers, 2014, 15(7):1 375-1 386.
- [6] Fan Yingying, Zheng Jianlun, Ren Jinghua, et al. Effects of storage temperature and duration on release of antimony and bisphenol A from polyethylene terephthalate drinking water bottles of China[J]. Environmental Pollution, 2014, 192(192C):113-120.
- [7] Suja P S, Reshmi C R, Sagitha P, et al. Electrospun nanofibrous membranes for water purification[J]. Polymer Reviews, 2017, 57(3):467-504.
- [8] Wu Keke, Yang Wufeng, Jiao Yanpeng, et al. A surface molecularly imprinted electrospun polyethersulfone (PES) fiber mat for selective removal of bilirubin[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2017, 5(29):5 763-5 773.
- [9] Wu Keke, Yang Wufeng, Liu Xiaoyan, et al. Electrospun porous polyethersulfone (PES) fiber mats with high bilirubin adsorption capacity[J]. Materials Letters, 2016, 185:252-255.
- [10] 孙键新, 张玉忠, 林立刚, 等. 4A 分子筛掺杂 PES 膜吸附剂的制备及其对 Cu^{2+} 吸附性能研究[J]. 天津工业大学学报, 2013, 32(1):5-9.
Sun Jianxin, Zhang Yuzhong, Lin Ligang, et al. Preparation and adsorption performance for Cu^{2+} of zeolite 4A-PES membrane adsorbents[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2013, 32(1):5-9.
- [11] 邱芳, 卫志美, 彭民乐, 等. 静电纺丝法制备多孔超细聚醚砜纤维及其对双酚 A 的吸附性能[J]. 中国塑料, 2015, 29(6):66-71.
Qiu Fang, Wei Zhimei, Peng Minle, et al. Electrospun porous ultrafine polyethersulfone fibers and their application in adsorption for bisphenol A[J]. China Plastics, 2015, 29(6):66-71.
- [12] Homaeigohar S S, Buhr K, Ebert K. Polyethersulfone electrospun nanofibrous composite membrane for liquid filtration[J]. Journal of Membrane Science, 2010, 365(1):68-77.
- [13] Christopherson G T, Song H, Mao H Q. The influence of fiber diameter of electrospun substrates on neural stem cell differentiation and proliferation[J]. Biomaterials, 2009, 30(4):556-564.

- Chen Huifen, Wang Xia, Sun Jing, et al. Progress in research of blending modification of SEBS [J]. China Plastics Industry, 2006, 34(4):1-4.
- [4] Wang Xia, Pang Shaolong, Yang Junhe, et al. Structure and properties of SEBS / PP / OMMT nanocomposites [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16:524-528.
- [5] Qazviniha M R, Abdouss M, Musavi M, et al. Physical and mechanical properties of SEBS / PP nanocomposites reinforced by nano CaCO_3 [J]. Mat.-wiss.u.Werkstofftech, 2016, 47(1):47-52.
- [6] 战双双,苑宾,牟晓娟,等. 充油 SEBS / PP 热塑性弹性体的制备及性能研究 [J]. 塑料科技, 2015, 43(1):46-50.
- Zhan Shuangshuang, Yuan Bin, Mou Xiaojuan, et al. Study on properties of oil-extended SEBS / PP thermoplastic elastomer and its preparation [J]. Plastics Science and Technology, 2015, 43(1):46-50.
- [7] 周伟平,刘先珍,朱建军,等. PA6 / SEBS / PP-g-MAH 的共混改性 [J]. 高分子材料科学与工程, 2004, 20(6):203-206.
- Zhou Weiping, Liu Xianzhen, Zhu Jianjun, et al. Modification of PA6 / SEBS / PP-g-MAH by blending [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2004, 20(6):203-206.
- [8] 杨挺,陈立强. 国内外 PBT 树脂市场现状及未来发展趋势 [J]. 塑料工业, 2013, 41(7):123-126.
- Yang Ting, Chen Liqiang. The current situation and future development trend of PBT resin market at home and abroad [J]. China Plastics Industry, 2013, 41(7):123-126.
- [9] 张忠厚,冯丽,何领好,等. PBT / PET 阻燃材料的非等温结晶动力学 [J]. 塑料, 2014, 43(3):103-106.
- Zhang Zhonghou, Feng Li, He Linghao, et al. Non-Isothermal crystallization kinetics of PBT / PET flame retardant materials [J]. Plastics, 2014, 43(3):103-106.
- [10] 李宏,罗筑,于杰,等. PBT / PC 共混体系相容性与力学性能的研究 [J]. 功能材料, 2009, 40(1):162-165.
- Li Hong, Luo Zhu, Yu Jie, et al. Study on compatibility and mechanical properties of PBT / PC blend system [J]. Journal of Functional Materials, 2009, 40(1):162-165.
- [11] 林向坤,卢翔,黄锦涛,等. PBT / SEBS 共混合金的形态与性能 [J]. 塑料工业, 2014, 42(7):97-101.
- Lin Xiangkun, Lu xiang, Huang Jintao, et al. Morphology and properties of PBT / SEBS blends [J]. China Plastics Industry, 2014, 42(7):97-101.
-
- (上接第 17 页)
- [14] Yoon K, Hsiao B S, Chu B. Formation of functional polyethersulfone electrospun membrane for water purification by mixed solvent and oxidation processes [J]. Polymer, 2009, 50(13):2 893-2 899.
- [15] 郭永梅. 双酚 A 的危害及相关限制法规 [J]. 塑料助剂, 2012(3):26-28.
- Guo Yongmei. Analysis of health hazards, legal restrictions and regulations for BPA [J]. Plastic Additives, 2012(3):26-28.
- [16] Wu Shuyan, Xu Qian, Chen Tianshu, et al. Determination of bisphenol A in plastic bottled drinking water by high performance liquid chromatography with solid-membrane extraction based on electrospun nylon 6 nanofibrous membrane [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2010, 38(4):503-507.
- [17] Cao Fuming, Bai Pengli, Li Haocheng, et al. Preparation of polyethersulfone-organophilic montmorillonite hybrid particles for the removal of bisphenol A [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 162(2):791-798.
- [18] Qiu Fang, Peng Minle, Wei Zhimei, et al. Preparation of bead-on-string nanofibers and its application for the removal of bisphenol A [C]. 2015, 814:125-131.
- [19] 宫建龙,苏博,罗来盛,等. 双酚 A 分子印迹聚醚砜纳米纤维膜的制备和识别性能的研究 [J]. 高分子学报, 2011(11):1 266-1 272.
- Gong Jianlong, Su Bo, Luo Laisheng, et al. Preparation and recognition properties of molecularly imprinted polyethersulfone nanofiber membranes towards bisphenol A [J]. Acta Polymerica Sinica, 2011(11):1 266-1 272.
- [20] Zhang Yijia, Wei Qiang, Zhang Quanchao, et al. Molecularly imprinted electrospinning polyethersulfone nano-scale fibers for the binding and recognition of bisphenol A [J]. Separation Science & Technology, 2011, 46(10):1 615-1 620.
- [21] Bolong N, Ismail A.F, Salim M R, et al. Negatively charged polyethersulfone hollow fiber nanofiltration membrane for the removal of bisphenol A from wastewater [J]. Separation & Purification Technology, 2010, 73(2):92-99.
- [22] 张菁菁,刘峻,刘水平,等. 不同接收浴对于电纺纤维串珠结构形态影响研究 [J]. 纳米科技, 2008(6):36-39.
- Zhang Jingjing, Liu Jun, Liu Shuiping, et al. Beaded ultrafine fibers formed through different collection methods during electrospinning [J]. Nanoscience & Nanotechnology, 2008(6):36-39.