

AgNPs-AC 复合纤维的制备及其吸附与抗菌性能

李海宁, 权文文, 徐超*, 吴悦

(西安科技大学 机械工程学院, 西安 710054)

摘要:制备具有较好吸附抗菌性能的纳米过滤材料是过滤领域的一个关键问题。在多种纤维与薄膜材料的制备方法中,静电纺丝法具有比表面积大、孔隙率高的特点,为制备具有吸附抗菌性能的纳米过滤材料提供了一种有效思路。本文通过静电纺丝法制备了纳米银颗粒-活性炭(AgNPs-AC)复合纳米纤维膜,将纳米银颗粒沉积在活性炭载体上,目的是制备一种具有良好吸附抗菌功能的高性能过滤电纺复合纤维膜。通过 SEM、XRD 等设备对复合纳米纤维的形貌与结构进行表征,并考察该复合纤维膜的吸附性能和抗菌性能。结果表明,所制备的 AgNPs-AC 复合纳米纤维膜随活性炭、银浓度的增大,纤维直径分布逐步趋于均匀。并且在 EVOH 质量分数为 10%,硝酸银/活性炭浓度比为 0.05/0.085 时,该复合纤维膜的吸附性能最好。此外,AgNPs-AC 复合纳米纤维膜对金黄色葡萄球菌表现出良好的抗菌性能。

关键词:静电纺丝; 纳米纤维; 吸附性能; 抗菌性能; 功能材料

现今,空气污染已经成为影响人体健康的主要问题。研究证明,造成这种不良健康问题的原因主要归咎于空气中传播的颗粒直径小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的细颗粒污染物(即 PM_{2.5})^[1,2]。针对此问题,研究学者提出两种解决方法:方法一是通过减少污染物的排放改善;方法二是通过制备过滤薄膜材料阻隔污染物^[3]。显然方法二是被动的保护方法,对大环境下的人类个体更具有直接的防污效果。传统的过滤材料主要由微米级纤维组成,例如熔融吹塑纤维、芳香族聚酰胺纤维以及玻璃纤维等^[4~6]。这些纤维材料一般只能过滤微米级的颗粒物,但是对于 PM_{2.5} 中亚微米级/纳米级的颗粒很难达到高效过滤的效果,而且很难实现对污染物的抗菌作用。

近年来,通过静电纺丝技术制备的纳米纤维薄膜具有高孔隙比、大比表面积、小纤维直径等优良特性^[7],在阻隔空气污染方面具有很大的潜力。王瑞卓等^[8]利用静电纺丝技术制备石墨烯/聚丙烯腈(GR/PAN)复合纳米纤维膜。研究表明,该复合纤维平均孔径小,过滤效率高达 98.86%,能有效实现对 PM_{2.5} 的过滤。以活性炭(AC)为溶质制备的活性炭纤维(ACF)因其比表面积大、吸附容量大等特点,现已广泛应用于过滤领域。彭鹏等^[9]提出一种由聚丙烯超细纤维与活性炭颗粒复合而成的空气过滤材料的制备方法,该复合纤维膜具有良好的防霉功能且透气性好、滤阻较低的优点。陈景林等^[10]制备出多层介质复合式高效低阻空气过滤材料。研究表明,该复合材料包含有三层过滤层,其中以活性炭为主的第二过滤层起主要作用,能够有效地将亚微米级微粒过滤掉,具有过滤效果好且结构设计新颖的优点。

但这些复合过滤材料不具有抗菌作用,同时由于活性炭纤维丰富的微多孔和巨大的比表面积结构,为微生物的生存提供了良好的环境,促进其成为污染源^[11]。因此,选择一种良好的抗菌材料是提高活性炭纤维自身抗菌性能的一个突破口。

本文提出一种通过静电纺丝技术将纳米银颗粒(AgNPs)与活性炭复合的方法,旨在解决过滤材料的抗菌性能问题。一方面,纳米银颗粒具备的表面效应、体积效应等不同于常规银材料的特殊效应,使得纳米银材料具有普通抗菌材料无法比拟的抗菌效果^[12~15]。另一方面,活性炭的高孔隙率能够为纳米银颗粒提供良好的载体。因此,将银纳米颗粒沉积在活性炭材料上,制备出 AgNPs 负载材料,可有效地解决

10.14028/j.cnki.1003-3726.2022.09.005

收稿:2021-04-26;修回:2021-11-08;

基金项目:综采成套装备信息映射配套模型及智能决策方法研究(52074210);

作者简介:李海宁,男,教授,从事先进制造方向。E-mail:1055001318@qq.com;

* 通讯联系人:徐超,男,讲师,主要从事增材制造方向。E-mail:Chaoxu@xust.edu.cn.

载银活性炭材料抗菌活性聚集的问题^[16,17]。

本研究首先以异丙醇为溶剂,以聚乙烯-乙烯醇(EVOH)颗粒、硝酸银固体以及粉末活性炭为溶质,通过静电纺丝技术制备纳米银颗粒-活性炭复合纤维膜(AgNPs-AC)。其次采用扫描电子显微镜(SEM)、能量色散 X 射线光谱仪(EDX)等设备对纳米复合纤维表面进行表征,并分析了该复合纤维的表面形态及纤维直径。最后对该复合纤维膜的吸附及抗菌性能进行分析评价。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

异丙醇(C₃H₈O),扬州天达化工有限公司;聚乙烯-乙烯醇(EVOH),深圳市丹盛塑胶有限公司;粉末活性炭(AC),河南水方程净水材料有限公司;硝酸银固体(AgNO₃),佛山市创亿有色贵金属有限公司;水中铜离子,无锡盛斯源化工有限公司。

SS-3556H 静电纺丝设备,北京新锐佰纳科技有限公司;扫描电子显微镜(SEM)、能量色散 X 射线光谱仪(EDX),日本 Hitachi 公司;磁力搅拌器,江苏金坛荣华仪器制造有限公司;PHS-3DW pH 酸度计,北京顺科达科技有限公司;SHA-C 恒温水浴振荡器,江苏旭日实验仪器厂;715-ES 电感耦合等离子体发射光谱仪,美国 Agilent 公司。

1.2 AgNPs-AC 复合纳米纤维膜前驱体溶液的制备

将 7mL 异丙醇和 3mL(或 8 : 2)去离子水混合为 10mL 溶液作为溶剂放入锥形瓶中,然后分别将(1.25、1.0、0.75g)EVOH 颗粒加入该混合溶液中,将锥形瓶放在磁力搅拌器上,并在 75℃ 条件下水浴加热搅拌,搅拌大约 2h 左右至溶解。在制备好的溶液中分别加入(0.20、0.50、0.80g)硝酸银固体,在相同条件下持续加热搅拌,直至硝酸银固体溶解。当溶液变成黄褐色时说明硝酸银固体完全溶解。此时,在该溶液中加入粉末活性炭(0.15、0.55、0.85g)进行溶解,溶解活性炭时不需要水浴加热,只需通过磁力搅拌器设定一定的转速搅拌即可,搅拌 5min 左右,使活性炭粉末均匀溶解在溶液里。

1.3 AgNPs-AC 复合纳米纤维膜的制备

用容量为 5mL 的注射器吸取 4mL 前驱体溶液放在注射泵上,并与高压电源正极相连,设定好电纺参数后使用静电纺丝设备对前驱体溶液进行电纺。设置电纺电压为 18kV,针头至收集器的距离为 15cm,接收滚筒的旋转速度为 500r/min,注射速度为 0.15~0.3mm/min,纺丝时间为 4h 左右。电纺结束后,将纤维膜从滚筒取下,得到 AgNPs-AC 复合纳米纤维膜。

1.4 结构表征与性能测试

1.4.1 结构表征 采用 SEM 观察 AgNPs-AC 复合纳米纤维膜表面银纳米颗粒和活性炭颗粒的形貌和大小;通过 EDX 观察该纤维表面颗粒的各组成元素。采用 ICP-OES 测定吸附后溶液中 Cu(Ⅱ)的浓度。

1.4.2 吸附性能测试 取标准铜溶液 1000mg/L,使用去离子水逐级稀释至浓度依次为 110、90、60、25mg/L 的使用液,各取 25mL,用 0.1mol/L HCl 或 25%的 NH₃·H₂O 溶液调节 pH 值至 8。然后称取不同浓度配比的 AgNPs-AC 复合纳米纤维膜各 100mg,并分别加入稀释好的含铜离子的溶液中,在 45℃ 的恒温水浴振荡器中振荡吸附 240min 后,取样过滤。采用 ICP-OES 测定吸附后溶液中重金属离子的浓度,代入下述公式(1)、(2)分别计算吸附量和吸附率。

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{W}$$

(1)

$$\text{吸附率}(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100$$

(2)

其中,C₀ 是初始重金属离子浓度(mg/L),C_e 是吸附平衡时重金属离子浓度(mg/L),V 是溶液的体积(L),W 是吸附剂的重量(g),q_e 为平衡吸附量(mg/g)。

1.4.3 抗菌性能测试 以测定金黄色葡萄球菌的抑菌环直径为衡量指标,对 AgNPs-AC 复合纳米纤维膜的抗菌性能进行检测^[18~20]。首先将复苏的菌液均分到 3 个试管,每管加培养基 3mL,在 37℃ 水浴摇床中过夜。在超净台中将其倒入培养皿(20mL/皿),冷却后在 4℃ 环境下密封保存备用。取 0.5mL 菌液,利用接种环使之涂覆均匀,将圆形纤维膜放置在不同区域,做好标记,在 37℃ 孵箱培养;然后将直径为 8mm 的圆形 AgNPs-AC 复合膜附着在上述琼脂培养基上,在 37℃ 下培养 24~48h,分别测定 4、8、12、24、36 和 48h 的抑菌环直径;最后通过光学显微镜观察抑菌环直径的大小,来评价 AgNPs-AC 复合纳米纤维膜的抗菌活性^[21]。

2 结果与讨论

2.1 AgNPs-AC 复合纳米纤维膜的表面

2.1.1 形貌分析 图 1(a~c)所示为银浓度 0.05g/mL,活性炭浓度 0.055g/mL,不同质量分数的 EVOH(7.5%、10.0%、12.5%)对应 AgNPs-AC 复合纤维的 SEM 图像。从图中可以看到,该复合纤维的微观结构为三维立体网状结构,且各纤维间排列杂乱,说明该复合纤维的各向同性效应相对较好。此外,AgNPs-AC 复合纤维的直径分布在 750~1900nm 之间,具备超细纤维的结构。从图 1 中还可以观察到,该复合纤维表面和内部均存在大量的 AgNPs,说明 AgNPs 成功附着在该复合纤维的表面。综上所述,该复合纤维具有优异的阻隔、过滤性能。

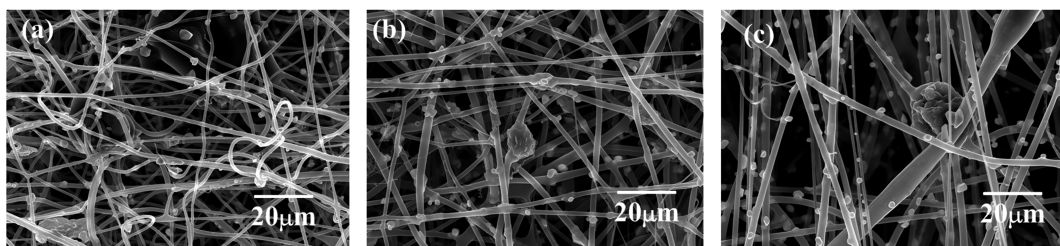


图 1 不同 EVOH 质量分数的 AgNPs-AC 复合纤维膜 SEM 图

(a)7.5%;(b)10.0%;(c)12.5%

Figure 1 SEM images of AgNPs AC composite fiber membrane with different mass fractions of EVOH

(a)7.5%;(b)10.0%;(c)12.5%

图 2(a)是 EVOH 质量分数 7.5%,银浓度 0.03g/mL、活性炭浓度 0.02g/mL 对应的复合纤维的 SEM 图,对该复合纤维表面进行能谱表征,得到该复合纤维所含元素的 EDX 图,其中,图 2(b)是标定点 1 处的 EDX 图,图 2(c)是标定点 2 处的 EDX 图。从图中可以发现,该复合纤维含有 C、O、Ag、Pt 四种元素,其中 Pt 元素是对该复合纤维做喷金处理后附着在纤维表面的。

图 3 为部分 AgNPs-AC 复合纤维的元素映射图,验证了该复合纤维中元素的分布情况。在纤维所含四种元素中,C 元素比重最大,最高达到 63.71%。其中,少部分 C 元素以块状结构分布,绝大部分 C 元素均匀分布在复合纤维膜表面。此外,在该表面分布有少量的银颗粒,说明活性炭与银颗粒的连接是可靠的^[22]。

2.1.2 工艺参数分析 使用 ImageJ 软件对不同纳米纤维的直径测量,分析不同聚合物浓度对纤维直径的影响。在同一 EVOH 质量分数下,图 4 所示为不同活性炭浓度对应复合纤维膜的 SEM 图像;图 5 所示为不同银浓度对应复合纤维膜的 SEM 图像。综合图 4、图 5 观察到随活性炭浓度与银浓度的增大,纤维直径逐渐增大。

观察图 6 发现,当 EVOH 的质量分数分别为 7.5%、10%和 12.5%,银浓度为 0.05g/mL 时,随着活性炭浓度的增大,复合纤维的直径也随之增大。这是因为纺丝液中添加活性炭后,使得液滴表面的粘滞力增加,在同一电场力的拉伸作用下,拉伸的程度逐渐减弱,使得纤维直径增大。

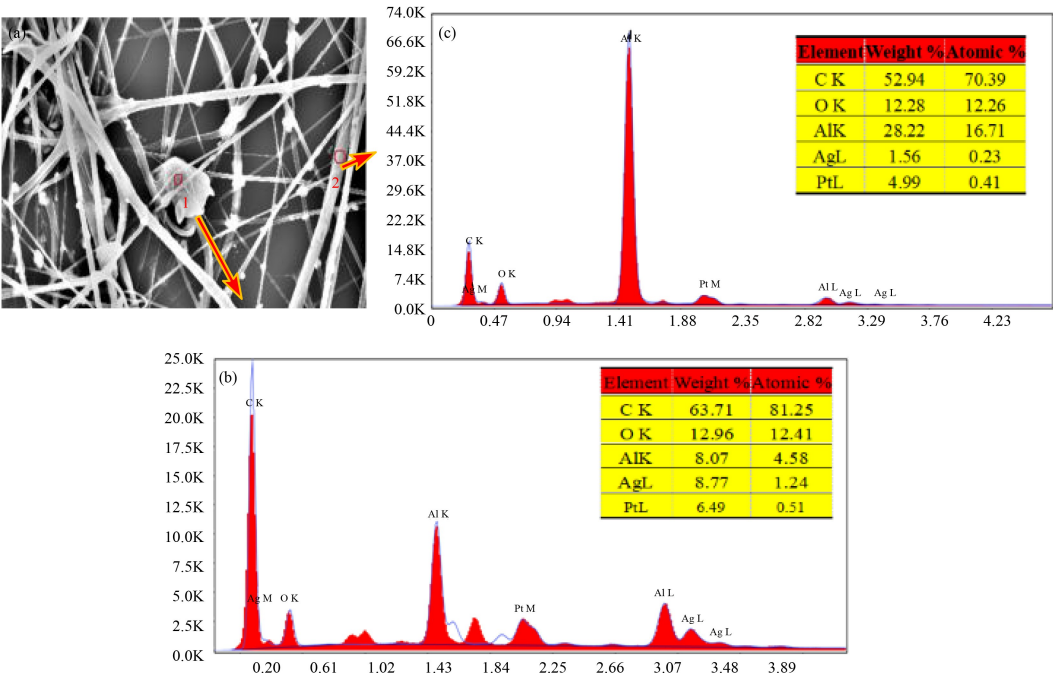


图 2 AgNPs-AC 复合纤维膜 EDX 图：(a)纤维膜 SEM 图；(b)标定点 1 EDX 图；(c)标定点 2 EDX 图

Figure 2 EDX of AgNPs-AC composite fiber membrane

(a)SEM image of fiber membrane；(b)EDX of calibration point 1；(c)EDX of calibration point 2

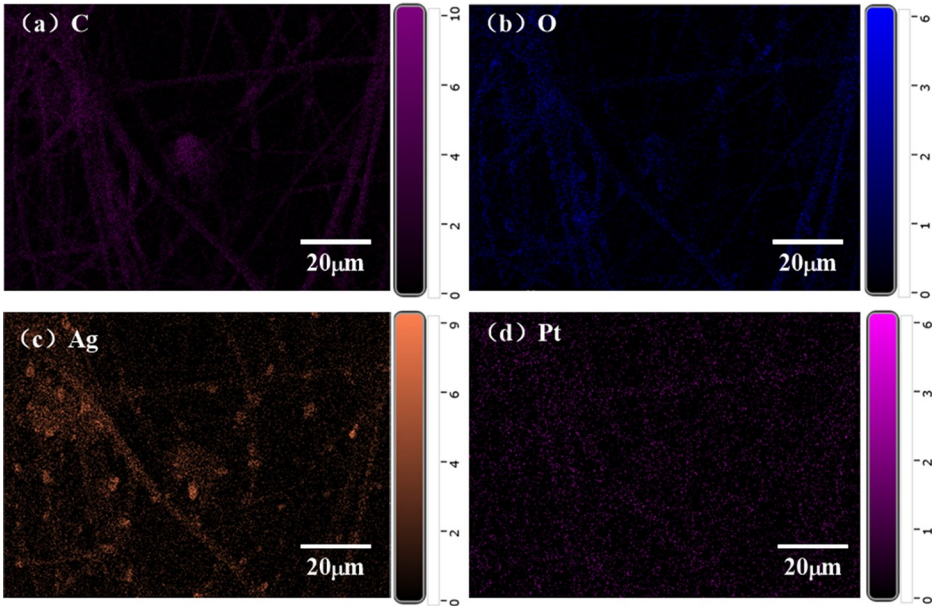


图 3 部分 AgNPs-AC 复合纤维的元素映射：(a) C, (b) O, (c) Ag, (d) Pt

Figure 3 Elemental mapping of partial AgNPs-AC composite fibers：(a) C, (b) O, (c) Ag, (d) Pt

由图 7 观察到,当 EVOH 的质量分数分别为 7.5%、10%和 12.5%,活性炭浓度为 0.015g/mL 时,银浓度对复合纳米纤维膜的平均直径影响不同。主要原因是随着银含量的增加,纳米银颗粒在 AgNPs-AC 复合纤维膜表面的密度显著增大,纳米银颗粒自身的导电性会导致液滴所在的电场减弱,从而使得形成的纤维直径较大。

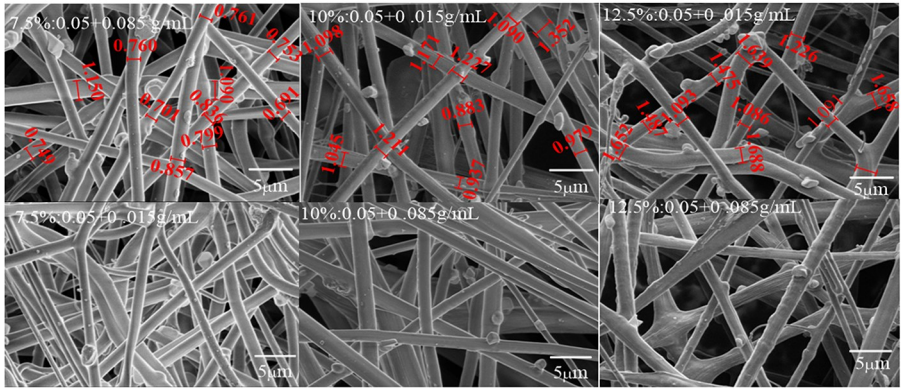


图 4 不同 AC 浓度的 SEM 图

Figure 4 SEM images of different AC concentrations

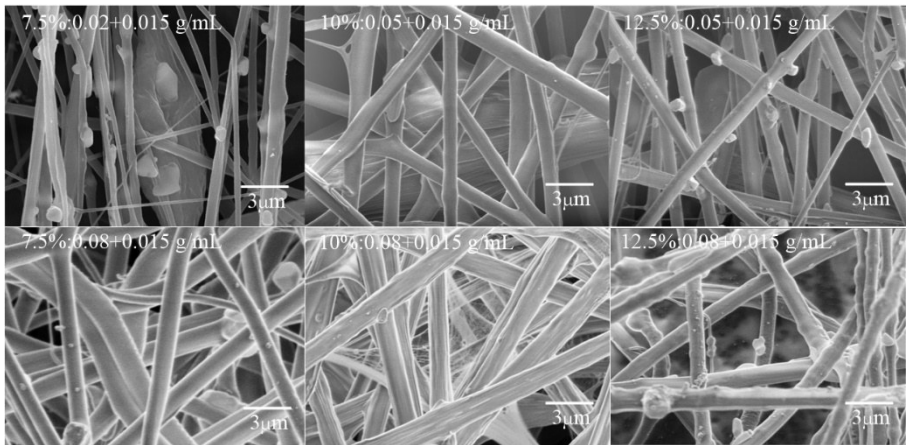


图 5 不同 Ag 浓度的 SEM 图

Figure 5 SEM images of different Ag concentrations

纵向观察图 6 和图 7 发现,EVOH 质量分数越高,各浓度对复合纤维直径的影响越大。这是因为 EVOH 作为纺丝液的主要溶质,随着其浓度的增大,促使溶液内部的粘滞力增加,在电纺过程中会加快溶剂挥发,形成的纤维较为干燥。而与较为湿润的纤维相比,其在电场力拉伸时拉伸作用力不太明显,因此收集到的纤维直径较大。

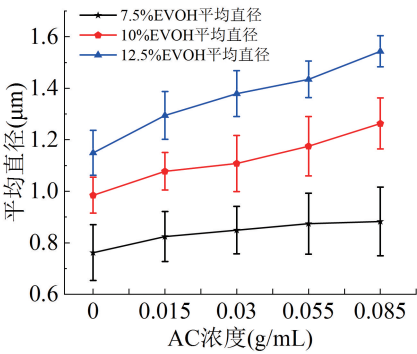


图 6 不同 AC 浓度纤维直径分布图

Figure 6 Diameter distribution with different AC concentrations

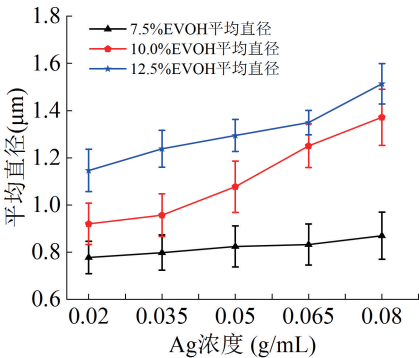


图 7 不同 Ag 浓度纤维直径分布图

Figure 7 Diameter distribution with different Ag concentrations

2.2 AgNPs-AC 复合纤维膜对 Cu(Ⅱ) 的吸附实验

AgNPs-AC 复合纳米纤维膜的吸附性能通过吸附初始浓度分别为 105、90、60、25mg/L 的 Cu(Ⅱ) 来评估。Yan 等^[23]研究发现,在较高的温度下,较大的纳米银颗粒(粒子)容易被激活,有利于促进复合纤维的吸附能力。此外,溶液 pH 值越小,复合纤维对重金属离子的吸附能力越低,这是因为在强酸条件下,纤维表面的氨基、羧基等官能团质子化反应明显,同时重金属离子与 H⁺ 的竞争作用加剧,影响了重金属离子在纤维膜上的附着^[24~26]。因此,本文选择温度为 45℃、pH 为 8 的条件下对 Cu(Ⅱ) 进行吸附实验。不同浓度配比下 AgNPs-AC 复合纳米纤维膜对 Cu(Ⅱ) 的吸附率对比结果如图 8 所示,其中横坐标样品名简称是根据纤维膜制备时加入溶质的先后顺序命名的,第一个表示 EVOH 的质量分数,第二个表示银浓度,第三个表示活性炭浓度。

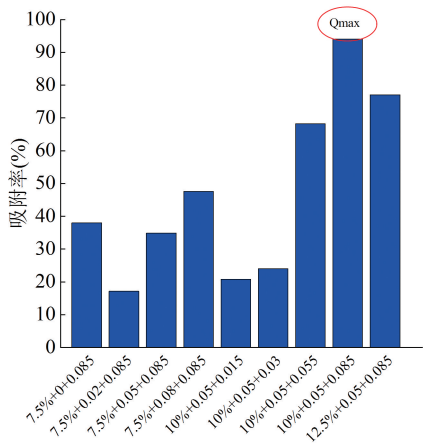


图 8 各 AgNPs-AC 复合纤维膜对 Cu(Ⅱ) 的吸附率分布图
Figure 8 Each AgNPs-AC composite fibers membrane for Cu(Ⅱ) adsorption rate distribution

从图 8 可以发现,EVOH 质量分数、银浓度、活性炭浓度不同时,该复合纤维膜对 Cu(Ⅱ) 的吸附效果存在较大的差异。在 EVOH 质量分数为 10%、银纳米粒子含量为 0.05g/mL、活性炭浓度为 0.085 g/mL 时,AgNPs-AC 复合纳米纤维膜对 Cu(Ⅱ) 的吸附性能最佳,其吸附率达到 94.07%。因此,结合吸附方程式 Langmuir(公式 3)和 Freundlich(公式 4)等温曲线拟合实验数据分析该浓度配比下的复合纤维膜对 Cu(Ⅱ) 的吸附机理^[27,28]。

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{k_L Q_m} \tag{3}$$

$$\ln q_e = \ln k_F + \frac{1}{n} \ln C_e \tag{4}$$

其中,Q_m 为最大吸附量(mg/g),k_L 为 Langmuir 平衡常数,k_F 为 Freundlich 平衡常数,n 为与吸附量有关的常数,C_e 为平衡浓度(mg/L),q_e 为平衡吸附量(mg/g)。

分别用 Langmuir 吸附等温线、Freundlich 吸附等温线拟合 AgNPs-AC 复合纳米纤维膜吸附 Cu(Ⅱ) 的实验数据,结果见表 1。其中,图 9、图 10 分别为 Langmuir、Freundlich 两个模型的等温线图,表 1 为两种模型的吸附等温线参数。

从以上图表中可知,AgNPs-AC 复合纤维膜吸附 Cu(Ⅱ) 的等温线实验数据与 Langmuir 模型吻合良好,具有很高的 R² 值(0.9573)。相反,实验结果与 Freundlich 吸附等温线模型并不匹配,R²<0.9。表明 AgNPs-AC 复合纤维膜吸附 Cu(Ⅱ) 更偏向于单层吸附。因此,可认为 Langmuir 模型比 Freundlich 模型更适合描述 AgNPs-AC 复合纤维膜对 Cu(Ⅱ) 的吸附。此外,从表 1 中可以看到,Langmuir 模型中平衡参数 R_L^[29] (有利:0<R_L<1,不利:R_L>1) 的值为 0.05,表明该吸附是沿着有利的方向发展,且 AgNPs-AC 复合纤维膜吸附中心位点的分布较为均匀^[30,31]。

表 1 两种模型的吸附等温线参数

Table 1 Adsorption isotherm parameters of the two models

等温模型	参数	初始浓度 C_0 (mg/L)	参数值
Langmuir 模型	Q_m (mg/g)	20~110	6.9142
	R^2		0.9573
	R_L		0.05
	k_L		0.1629
	k_F		163.24
Freundlich 模型	R^2	20~110	0.8912
	$1/n$		-1.28

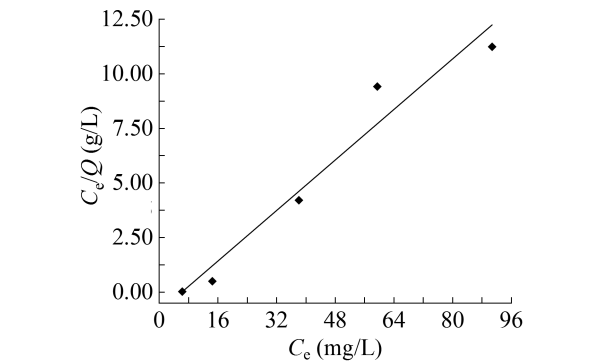


图 9 Cu(Ⅱ)的 Langmuir 吸附等温线的拟合图

Figure 9 Cu(Ⅱ) Langmuir adsorption isotherm of fitting

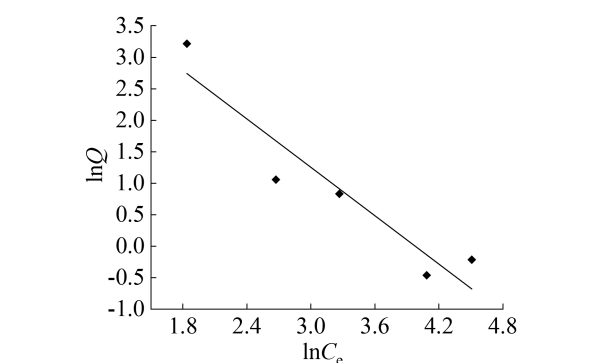


图 10 Cu(Ⅱ)的 Freundlich 吸附等温线的拟合图

Figure 10 Cu(Ⅱ)Freundlich adsorption isotherm of fitting

图 11 为不同接触时间对吸附量的影响规律图,可以发现,随着接触时间的增大,AgNPs-AC 复合纤维膜的吸附量依次增大,且接触时间在 30~80min 时间段时,吸附速率最快,随后吸附速率变缓慢,并逐渐趋于平缓,在 240min 时吸附基本达到平衡,可以认为 240min 是吸附平衡时间。

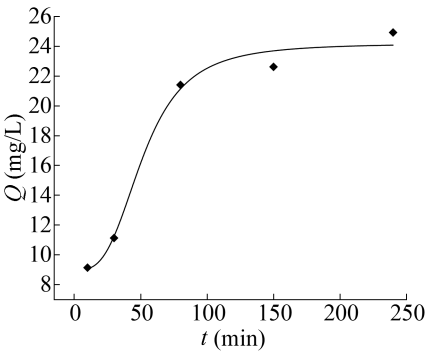


图 11 接触时间对 Cu(Ⅱ)吸附的影响

Figure 11 Contact time of Cu(Ⅱ) the influence of adsorption

2.3 AgNPs-AC 膜的抗菌性能

采用抑制区法评价了 AgNPs-AC 对金黄色葡萄球菌的抗菌活性^[32]。称取 3.6g NB 营养肉汤粉,加入 200mL 去离子水,加热溶解后调节 pH 值至 7.2~7.4,在 115℃ 高压灭菌 30min,并在 37℃ 孵育一个晚上。将不同 AgNPs-AC 复合纤维样品的圆盘(直径 8mm)置于不同培养皿的固化琼脂凝胶上,在 37℃ 下孵育 48h。分别在 4、8、12、24、36、48h 这 6 个时间点拍摄照片,得到抑制区和抑菌环直径如图 12 所示。

大量研究表明,银纳米颗粒对细菌菌株的抑制作用主要与细菌的细胞壁有关。它通过穿透细胞壁,干扰细胞质中某些矿物质的进入和输出,来抑制细菌生长^[33~36]。从图 12 中观察到,含银纳米颗粒的复

合纳米纤维膜处有抑菌环形成,且抑菌环直径大小不一致,而不含银纳米颗粒的复合纳米纤维没有出现抑菌环。图 13、14 分别为不同银浓度及活性炭浓度对抑菌环的影响。图中曲线表明,抑菌环直径随银浓

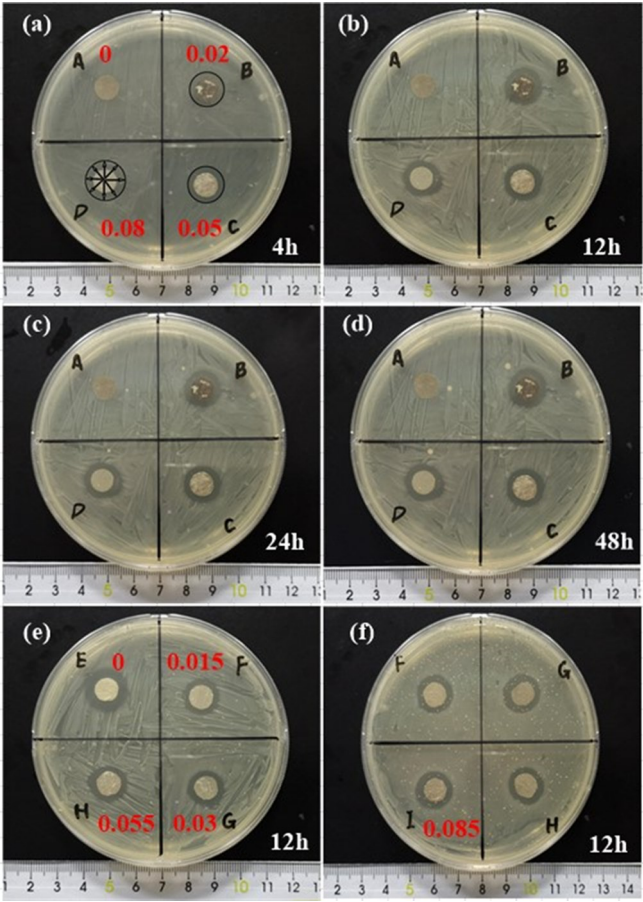


图 12 AgNPs-AC 复合纤维膜对金黄色葡糖球菌的抑制区：
(a-d)为不同银浓度对应抑菌区；(e, f)为不同活性炭浓度对应抑菌区

Figure 12 Zone of inhibition againsts *S. aureus* bacteria by AgNPs-AC composite fibers membranes:
(a-d) Denotes the bacteriostatic zone corresponding to different silver concentrations; (e, f) The corresponding antibacterial zone of different activated carbon concentrations

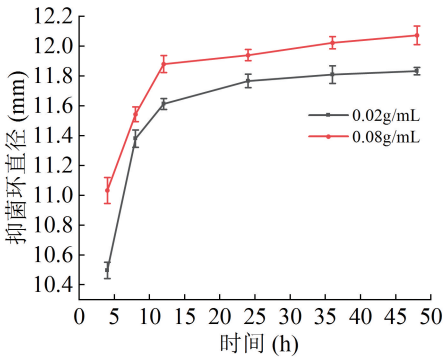


图 13 银浓度对抑菌环直径影响

Figure 13 Effect of silver concentration on diameters of inhibition ring

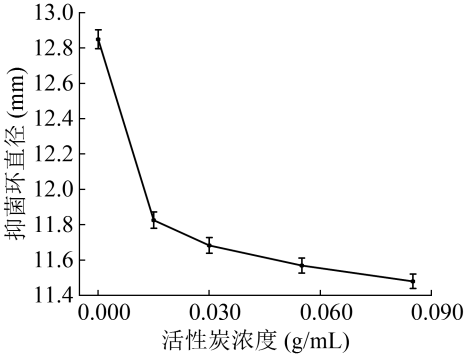


图 14 活性炭浓度对抑菌环直径影响

Figure 14 Effect of activated carbon concentration on diameters of inhibition ring

度的增加而增大,且随时间的延长,所形成的抑菌环直径逐渐增大并趋于平缓。相反,随活性炭浓度的增大,抑菌环直径随其浓度逐渐减小。这是因为随活性炭含量的增大,活性炭提供的吸附位点增多,使得部分银颗粒嵌入纤维内部,导致暴露在纤维表面的银颗粒数量减少,最终影响抑菌环的直径大小。

3 结 论

本文提出一种通过静电纺丝技术制备 AgNPs-AC 复合纤维膜的方法。采用 SEM、EDX 等设备表征该复合纤维膜的形貌,发现 AgNPs-AC 复合纤维表面不光滑,其表面分布有大量的银颗粒和活性炭颗粒,并且随银浓度与活性炭浓度的增大,纤维直径分布逐渐趋于均匀。

(1)AgNPs-AC 复合纤维膜对 Cu(Ⅱ)的吸附实验表明,当 EVOH 质量分数为 10%,银浓度为 0.05g/mL,活性炭浓度为 0.085g/mL 时,对 Cu(Ⅱ)的吸附性能最好,最高达到 94.07%,且该复合纤维对 Cu(Ⅱ)的吸附更符合 Langmuir 模型;

(2)通过测定 AgNPs-AC 复合纤维膜的抗菌性能,发现银含量的增多会促进抑菌环直径增大,活性炭浓度增大则会抑制抑菌环直径的增大。

综上所述,AgNPs-AC 复合纤维膜具有优良的吸附、抗菌性能,且其所需材料经济环保。此项研究在纤维材料的应用领域(如废水过滤、口罩和其它过滤方面)具有潜在的应用价值,并为纳米过滤材料的后续研究提供了一种新思路。

参考文献:

- [1] Chen K N, Sari F N, Ting J M. Appl Surf Sci, 2019, 493:157~164.
- [2] Qiu H, Tian L, Ho K. Environ Pollut, 2015, 199:192~197.
- [3] Gao X, Li Z K, Xue J, Qian Y, Zhang L Z, Wang H H. J Membr Sci, 2019, 586:162~169.
- [4] 陈乐乐,丁玲,王铖博,滕桂香,农金旺,邱婷,张继. 高分子通报, 2020,(4):37~43.
- [5] Liu J, Jiang T, Li X, Wang Z L. Nanotechnology, 2019, 30(29):292001.
- [6] Tian H, Fu X, Zheng M. Nano Res, 2018, 11(8):4265~4277.
- [7] 蒋敏,王敏,魏仕勇,李素英,张伟. 化学进展, 2016, 28(5):711~726.
- [8] 王瑞卓,王玉红,詹天航,李新伟,杨文秀. 产业用纺织品, 2020,38(1):16~19,27.
- [9] 彭鹏,常敬颖,张瑜,李素英,张伟. 化工新型材料, 2015, 43(11):71~73.
- [10] 陈景林,杨其松,阳业林,阳业春. 多层介质复合式高效低阻空气过滤材料. 广东:广州市三泰汽车内饰材料有限公司, 2017.
- [11] Xiao W M, Lei Y P, Xia Z D, Chen X, Han Y. J Alloys Compd, 2017, 8:75.
- [12] 肖长发,赵健,封严,徐乃库. 高分子通报, 2013, (10):103~114.
- [13] Jatoi A W, Kim I S, Ni Q Q. Materials, 2019, 98:1179~1195.
- [14] 夏雪晴,王珂,陈丰,刘成宝. 天津化工, 2020, 34(6):16~18.
- [15] Tang C L, Xing B, Hu G S, Huang F L, Zuo C C. Mater Lett, 2017, 188:289~297.
- [16] 刘源,曹苹,何佳,林钟石,邱涛,李淳,蔡信东,敖宁建. 高分子通报, 2014, (6):40~45.
- [17] 郭杰,徐熠,蔡志江. 高分子通报, 2015,(4):45~51.
- [18] 张隐,潘明珠. 高分子通报, 2021,(1):17~27.
- [19] Duan G G, Fang H, Huang C B. J Mater Sci, 2018, 53(21):15096~15106.
- [20] 周建华,陈锋,丁玎. 科技与创新, 2019, 16:34~35.
- [21] Lv D, Zhu M, Jiang Z, Jiang S, Zhang Q. Macromol Mater Eng, 2018, 1800336(303):1~18.
- [22] Joanna G, Michał M, Robert P. Chem Eng J, 2014, 247: 258~264.
- [23] Yan X F, Fan X R, Wang Q, Shen Y. Thermal Sci, 2018, 22(1 Part A):11~16.
- [24] 狄志清,张钱丽,魏杰. 水处理技术, 2015, 41(3):54~57,63.
- [25] 保佳媛,李峻峰,张钱丽,魏杰. 苏州科技学院学报, 2015, 32(3):30~35.
- [26] 郝一男,王喜明,丁立军. 东北农业大学学报, 2011, 42(11):77~82.
- [27] Zhao R, Li X, Sun B L. J Mater Chem, 2017, 5(3):1133~1144.
- [28] 周逸如,杨智联,舒雨霞. 产业用纺织品, 2019, 37(10):7~14.

- [29] Hong S M, Kim J W, Knowles J C, Gong M S. J Biomater Appl, 2017, 31(7):1026~1038.
- [30] Gan L, Geng A, Wu Y, Wang L J, Xu L J. Polymers, 2020, 12(1):35~46.
- [31] 叶文婷, 王荣武. 上海纺织科技, 2021, 49(6):19~23,27.
- [32] Lee W J, Lee J, Kim M H, Kim C S. J Nanosci Nanotechnol, 2019, 19(2):697~700.
- [33] Li H, Wang Z, Zhang H. Polymers, 2018, 10(10):973~1085.
- [34] Xu C, Xu F, Wang B, Lu T J. J Nanomater, 2011, 95:27~34.
- [35] Tan L, Hu J L, Huang H H. Int J Biol Macromol, 2015, 79:469~476.
- [36] Li F, Kang W M, Dong Y C. Catal Commun, 2015, 69:150~153.

Preparation of AgNPs-AC Composite Fiber and Its Adsorption and Antibacterial Properties

LI Hai-ning, QUAN Wen-wen, XU Chao^{*}, WU Yue

(College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: It is an important problem that fabricating nano-filter materials with good adsorption and antibacterial properties in the application of nano-fiber membranes in the field of filtration. Among the preparation methods of various fiber and film materials, the electrospinning method has the characteristics of large specific surface area and high porosity, which provides an effective idea for preparing nano-filter materials with adsorption and antibacterial properties. In this study, the nano-silver particles-activated carbon (AgNPs-AC) composite nanofiber membrane was prepared by the electrostatic spinning method, and nano-silver particles were deposited on the activated carbon carrier so that a high-performance filter electrospun composite fiber membrane with good antibacterial adsorption can be prepared. The morphology and structure of the composite nanofibers were characterized by scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and other equipments. Besides, the adsorption performance and antibacterial properties of the composite fiber membrane were investigated. The results show that the fiber diameter distribution of the prepared AgNPs-AC composite nanofiber membrane gradually tends to be uniform with the increase of activated carbon and silver concentration. Moreover, when the EVOH mass fraction is 10% and the silver nitrate/activated carbon concentration ratio is 0.05/0.085 (g/mL), the composite fiber membrane possesses the best adsorption performance. In addition, the AgNPs-AC composite nanofiber membrane shows good antibacterial properties against *Staphylococcus aureus*.

Key words: Electrospinning; Nanofiber; Adsorptive property; Antimicrobial property; Functional materials