

# 聚乙烯醇/海藻酸钠复合纳米纤维膜的制备及性能

明贺娜<sup>1</sup> 刘福琛<sup>2</sup> 郭肖青<sup>1</sup> 孙启航<sup>1</sup> 孙明志<sup>3</sup> 张传杰<sup>1</sup> 刘杰<sup>1</sup>

1. 青岛大学 纺织服装学院, 山东 青岛 266071;
2. 海马地毯集团有限责任公司, 山东 威海 264200;
3. 浦特柯材料科技有限责任公司, 山东 威海 264499

**摘要:**采用静电纺丝法制备聚乙烯醇(PVA)/海藻酸钠(SA)复合纳米纤维膜,然后采用氯化钙作为交联剂,对PVA/SA复合纳米纤维膜进行交联。研究静电纺丝工艺参数包括PVA溶液与SA溶液质量比、纺丝电压、接收距离对PVA/SA复合纳米纤维膜结构与性能的影响,分析纤维直径及其分布。发现PVA/SA复合纳米纤维膜的最佳静电纺丝工艺参数:质量分数为8%的PVA溶液与质量分数为2%的SA溶液质量比9:1、纺丝电压22 kV、接收距离10 cm。在此工艺条件下可得到形貌良好、直径分布均匀的PVA/SA复合纳米纤维,其平均直径为60.42 nm。傅里叶变换红外光谱分析、X射线衍射分析和动态接触角测试结果表明:SA的加入使PVA结晶度有所降低;PVA/SA复合纳米纤维膜表现出更强的亲水性,而交联后的纳米纤维膜表现出较强的疏水性。

**关键词:** 聚乙烯醇;海藻酸钠;静电纺丝;溶液质量比;纺丝电压;接收距离;纳米纤维膜;交联;亲水性;疏水性  
**中图分类号:** TQ 340.64 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7093(2025)01-0007-09

## Preparation and properties of polyvinyl alcohol/sodium alginate composite nanofiber membranes

Ming Hena<sup>1</sup>, Liu Fuchen<sup>2</sup>, Guo Xiaoqing<sup>1</sup>, Sun Qihang<sup>1</sup>, Sun Mingzhi<sup>3</sup>, Zhang Chuanjie<sup>1</sup>, Liu Jie<sup>1</sup>

1. College of Textile and Clothing, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, China;
2. Haima Carpet Group Co., Ltd., Weihai 264200, Shandong, China;
3. Putek Material Technology Co., Ltd., Weihai 264499, Shandong, China

**Abstract:** Polyvinyl alcohol (PVA)/sodium alginate (SA) composite nanofiber membranes were prepared by electrospinning method, and then calcium chloride was used as crosslinking agent to cross-link PVA/SA composite nanofiber membranes. The effects of electrospinning process parameters, including the mass ratio of PVA solution to SA solution, spinning voltage, receiving distance, on the structure and properties of PVA/SA composite nanofiber membranes were studied, and the fiber diameter and its distribution were analyzed. The optimal electrospinning process parameters for the PVA/SA composite nanofiber membrane were found to be the mass ratio of PVA solution with mass fraction of 8% to SA solution with mass fraction of 2% was 9:1, the spinning

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2022QE182);泰山产业领军人才工程(tscy20221176)

收稿日期:2024-08-26

作者简介:明贺娜,女,1999年生,在读硕士研究生,主要研究方向为功能纤维与功能纺织品的开发及应用,mhn0121@163.com

通信作者:刘杰,博士,讲师,硕士生导师,主要研究方向为功能纤维与功能纺织品的开发及应用,jliu0411@163.com

voltage was 22 kV, and the receiving distance was 10 cm. Under this process condition, PVA/SA composite nanofibers with good morphology and uniform diameter distribution could be obtained, with an average diameter of 60.42 nm. The results of Fourier transform infrared spectrum analysis, X-ray diffraction analysis and dynamic contact angle test results showed that, the addition of SA reduced the crystallinity of PVA. PVA/SA composite nanofiber membranes showed stronger hydrophilicity, while the crosslinked nanofiber membranes showed stronger hydrophobicity.

**Keywords:** polyvinyl alcohol; sodium alginate; electrospinning; mass ratio of solutions; spinning voltage; receiving distance; nanofiber membrane; cross-link; hydrophilicity; hydrophobicity

静电纺丝具有制造装置简单、纺丝成本低廉、可纺材料种类多样及工艺可控等优势,已成为有效制备纳米纤维材料的主要方法之一。如今,静电纺丝产品已被广泛应用于过滤分离、生物工程及电子器件等多个领域<sup>[1-3]</sup>。

海藻酸钠(SA)是从棕色海藻中提取的一种天然多糖,易于获取<sup>[4]</sup>。SA还具有良好的生物相容性,能够与除镁、汞之外的二价金属离子发生快速的离子交换反应,生成海藻酸盐凝胶。其中,与氯化钙反应生成的凝胶薄膜强度最大<sup>[5]</sup>。但SA自身的刚性和扩展链构象导致其分子链虽重叠紧密,但缺乏有效的链缠结,加之其水溶液表面张力较高,故仅采用SA水溶液很难通过静电纺丝获得纤维<sup>[6]</sup>。高相对分子质量聚合物拥有长且灵活的分子链,即使在较低的浓度下也容易形成有效的网络缠结,故可通过添加特定高相对分子质量的聚合物改善SA的静电纺丝性能<sup>[7]</sup>。聚乙烯醇(PVA)是一种力学性能优异且可生物降解的水溶性高分子材料,广泛应用于医疗、化妆品、食品、制药和包装等行业。PVA可以在各种溶剂中形成物理凝胶,常用于静电纺丝。如通过静电纺丝制备的PVA纳米纤维已用于组织工程支架等领域<sup>[8]</sup>。此外,PVA还是黏合剂、乳化剂等助剂的制造原料<sup>[9]</sup>。利用PVA与SA分子间的相互作用,可提高它们分子链段的缠结度,进而提升SA溶液的静电纺丝性能<sup>[10]</sup>。PVA/SA复合纳米纤维膜在医疗领域应用潜力巨大。亲水性的SA经疏水改性后与PVA复合,得到的复合纳米纤维膜非常适合制作伤口敷料,尤其适用于湿性愈合环境。疏水性一方面可减少敷料对伤口渗出液的过度吸收,保持伤口适度湿润,另一方面可避免敷料粘连伤口,减少敷料更换时对伤口的二次伤害。此外,负载药物的敷料还可以实现缓慢释放。

本文将采用静电纺丝法制备PVA/SA复合纳米纤维膜(简称PVA/SA复合膜),随后在氯化钙溶液中进行交联形成PVA/SA复合纳米纤维交联膜(简称PVA/SA交联膜),研究PVA溶液与SA溶液质量比(本文用质量分数为8%的PVA溶液与质量分数为2%的SA溶液的质量比表示)、纺丝电压、接收距离对纤维膜微观形貌的影响,探讨交联前后纤维膜结构和性能的变化,以期PVA/SA复合纳米纤维的制备及应用提供指导与参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试剂与仪器

PVA(型号17-88),分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;SA,黏度800 mPa·s,分析纯,青岛海之林生物科技开发有限公司;氯化钙,分析纯,上海麦克林生化科技有限公司。

扫描电子显微镜(SEM,型号Axio scope A1 POL),德国卡尔蔡司公司;傅里叶变换红外光谱仪(FTIR,型号Nicolet iS50),美国Thermo Scientific公司;X射线衍射仪(XRD,型号Smartlab SE),日本理学公司;光学接触角测量仪(型号Theta),瑞典Biolin公司。

### 1.2 试验过程

#### 1.2.1 纺丝液的制备

在室温条件下取一定量的PVA和SA粉末分别置于三口烧瓶中,加入去离子水,在65℃的水浴锅中加热搅拌4h,最终制得质量分数分别为6%、8%、10%的PVA溶液和2%的SA溶液。按一定质量比将优选的PVA溶液和SA溶液进行共混,室温下搅拌2h使两者混合均匀,最后将共混溶液倒入离心管中进行离心消泡,得到PVA/SA共混纺丝溶液。

### 1.2.2 PVA/SA 复合膜的制备及交联

首先,将 PVA/SA 共混纺丝溶液装入针管容积 10 mL、针头直径 0.4 mm 的一次性注射针管中,排尽气泡后将注射针管装进静电纺丝机的推注泵中。设置供液速度为 1.0 mL/h,纺丝电压为 15、22、29 kV,接收距离为 5、10、15 cm,辊筒转速为 300 r/min,纺丝时间为 10 h,得到白色的 PVA/SA 复合膜,室温晾干。然后,将晾干的 PVA/SA 复合膜浸泡在质量分数为 5% 的  $\text{CaCl}_2$  溶液中 5 min,使 PVA/SA 复合膜与钙离子发生交联反应。最后,取出纤维膜,用去离子水反复冲洗,室温晾干,即得 PVA/SA 交联膜。

所有样品均在温度  $(27 \pm 2)^\circ\text{C}$  和相对湿度  $(40 \pm 1)\%$  的条件下收集。

### 1.3 测试与表征

使用 SEM 对纳米纤维的形貌进行观察,放大 10 000 倍。根据纳米纤维的 SEM 图像,随机选择 100 根纤维并使用 Nano Measure 1.2 软件进行纤维直径的测量。

采用傅里叶变换红外光谱仪对 PVA 纳米纤维膜、SA 粉末、PVA/SA 复合膜进行扫描,扫描范围为  $600 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ ,分辨率为  $4\text{ cm}^{-1}$ ,每个频谱扫描 32 次。

采用 X 射线衍射仪对 PVA 纳米纤维膜、PVA/SA 复合膜进行扫描,扫描范围为  $5^\circ \sim 40^\circ$ ,扫描速度为  $8\text{ (}^\circ\text{)}/\text{min}$ ,Cu 靶,40 kV,350 mA。

使用光学接触角测量仪,测量并记录 PVA/SA 复合膜及其交联膜在 0、3、6、9 s 时的水接触角变化情况。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PVA 质量分数对纤维形貌的影响

图 1 为参照 1.2.2 节的参数,采用不同质量分数 PVA 溶液在纺丝电压为 22 kV、接收距离为 10 cm 条件下,制备的 PVA 纳米纤维的 SEM 图像和直径分布图。

从图 1 可以看出:当 PVA 质量分数为 6% 时,PVA 纳米纤维之间有轻微粘连,纤维平均直径为 84.57 nm,直径分布不均匀;当 PVA 质量分数为 8% 时,PVA 纳米纤维形貌良好,纤维平均直径为

84.99 nm,直径分布均匀;当 PVA 质量分数增加到 10% 时,PVA 纳米纤维之间有轻微粘连,纤维平均直径为 105.21 nm,纺丝时纺丝液在针头处易凝结形成堵塞,导致纺丝效率较低。可见,随着纺丝液中 PVA 质量分数的增加,纤维直径增加,这与纺丝液黏度增加,电场力对纺丝液的分化能力减弱有关<sup>[11]</sup>。综上,PVA 质量分数为 8% 时,所得 PVA 纳米纤维形貌最佳。故下文将针对质量分数为 8% 的 PVA 溶液与 SA 溶液共混并静电纺丝得到的 PVA/SA 复合膜展开探究。

### 2.2 PVA 溶液与 SA 溶液的质量比对纤维形貌的影响

图 2 为采用不同质量比 PVA/SA 共混纺丝溶液制备的 PVA/SA 复合纳米纤维(纺丝电压 22 kV、接收距离 10 cm)的 SEM 图像和直径分布图。

不同质量比的 PVA/SA 共混纺丝溶液静电纺丝得到的纤维形貌各不相同。当纺丝溶液的浓度与黏度超过某一临界值时,分子链间的缠结度会显著提高,这有利于形成连续且稳定的纤维结构<sup>[12]</sup>。从图 2 可以看出:当 PVA/SA 共混纺丝溶液中 SA 含量较低时,PVA 大分子网络能够与 SA 分子形成有效的缠结,所得 PVA/SA 复合纳米纤维形貌良好且粗细均匀;随着 PVA/SA 共混纺丝溶液中 SA 含量的增加,纤维间出现了粘连和串珠的现象,且纤维粗细不匀,这与 SA 含量增加,PVA/SA 共混纺丝溶液黏度随之增加,纺丝溶液表面张力增大,针头处易形成液滴有关。综上,当 PVA/SA 共混纺丝溶液中 PVA 溶液与 SA 溶液质量比为 9:1 时,纺制的 PVA/SA 复合纳米纤维形貌最佳。

### 2.3 纺丝电压对纤维形貌的影响

图 3 为采用不同纺丝电压制备的 PVA/SA 复合纳米纤维(PVA 溶液与 SA 溶液质量比 9:1、接收距离 10 cm)的 SEM 图像和直径分布图。

从图 3 可以看出:当纺丝电压为 15 kV 时,纤维间产生了粘连,且纤维粗细不匀,这与纺丝电压较小时,纺丝溶液表面张力大于其所受到的静电斥力,导致溶剂挥发不完全有关;当纺丝电压升高至 22 kV 时,纺制的纤维形貌规整,表面光滑,直径更小且分布更加均匀,纤维平均直径为 60.42 nm;继续增加纺丝电压至 29 kV 时,纺丝射流因过高的电压而速度加快,溶剂挥发时间缩短,纤维间大面积粘连,且

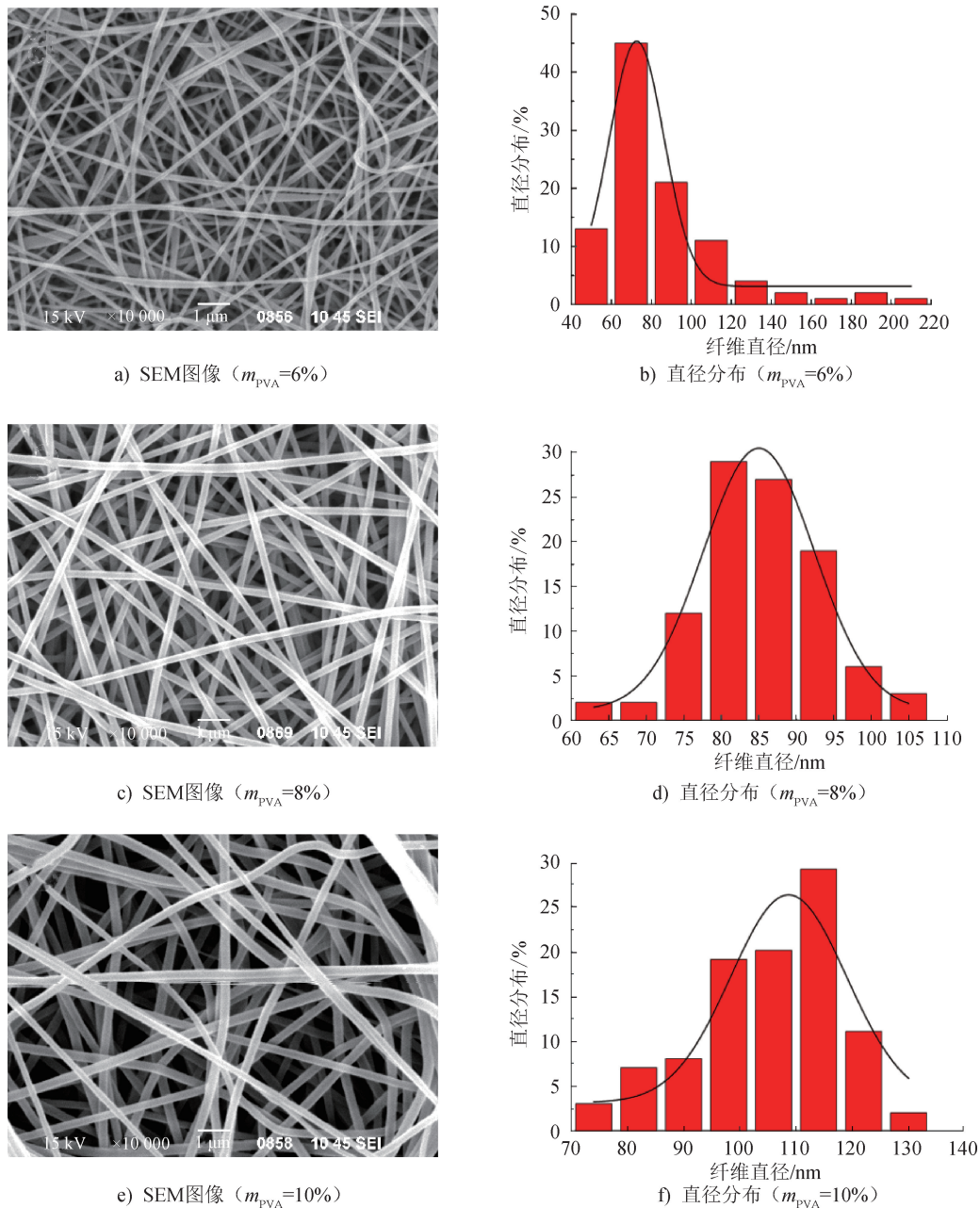


图1 不同质量分数PVA纳米纤维的SEM图像和直径分布

Fig. 1 SEM images and diameter distribution of PVA nanofibers with different mass fractions

纤维粗细不匀。综上,纺丝电压为22 kV时,纺制的PVA/SA复合纳米纤维形貌最佳。

#### 2.4 接收距离对纤维形貌的影响

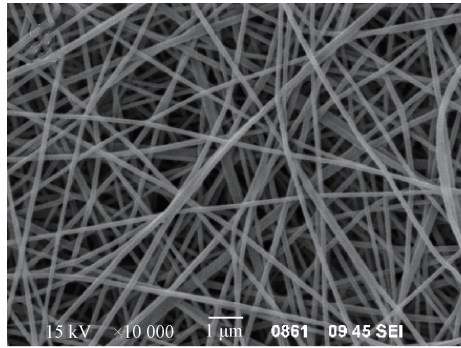
图4为采用不同接收距离制备的PVA/SA复合纳米纤维(PVA溶液与SA溶液质量比9:1、纺丝电压22 kV)的SEM图像和直径分布图。

从图4可以看出:当接收距离过小,为5 cm时,溶剂挥发不充分,纤维间出现了大面积的液斑;当接收距离为10 cm时,纺丝射流可获得充足的时间拉

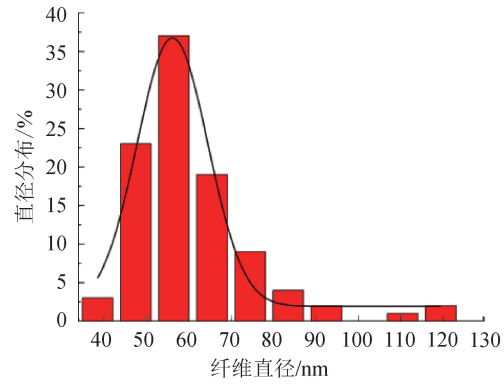
伸,这有利于溶剂的挥发,最终形成形貌良好且粗细均匀的纤维;当接收距离为15 cm时,过大的接收距离使得电场强度降低,这不利于溶剂的挥发,导致纤维直径增加且粗细不匀<sup>[13]</sup>。综上,当接收距离为10 cm时,纺制的PVA/SA复合纳米纤维形貌最佳。

#### 2.5 红外光谱分析

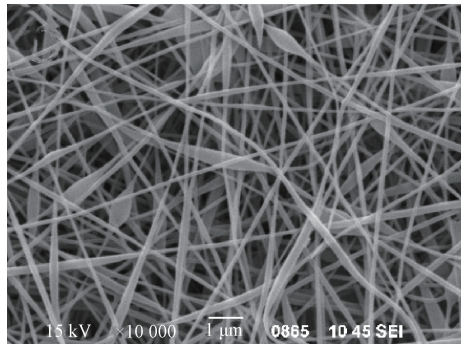
图5为SA粉末、PVA纳米纤维膜(PVA质量分数8%)及PVA/SA复合膜(PVA溶液和SA溶液质量比9:1)的红外光谱图,纤维膜的纺丝条件皆为纺丝



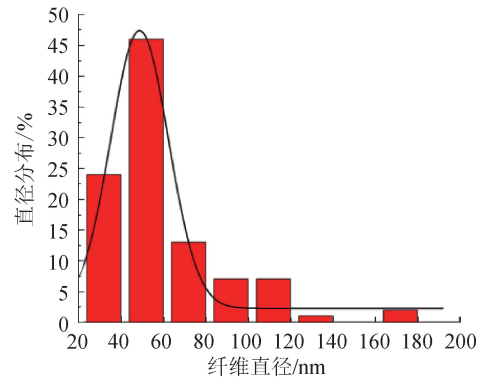
a) SEM 图像 ( $m_{8\%PVA} : m_{2\%SA} = 9 : 1$ )



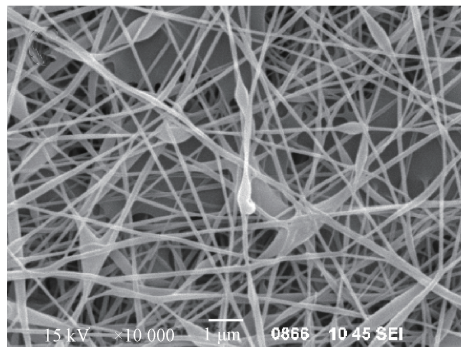
b) 直径分布 ( $m_{8\%PVA} : m_{2\%SA} = 9 : 1$ )



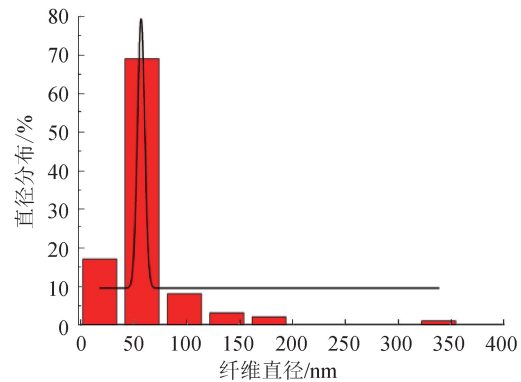
c) SEM 图像 ( $m_{8\%PVA} : m_{2\%SA} = 8 : 2$ )



d) 直径分布 ( $m_{8\%PVA} : m_{2\%SA} = 8 : 2$ )



e) SEM 图像 ( $m_{8\%PVA} : m_{2\%SA} = 7 : 3$ )



f) 直径分布 ( $m_{8\%PVA} : m_{2\%SA} = 7 : 3$ )

图 2 采用不同质量比 PVA/SA 共混纺丝溶液制备的 PVA/SA 复合纳米纤维的 SEM 图像和直径分布  
Fig. 2 SEM images and diameter distribution of PVA/SA composite nanofibers prepared from PVA/SA mixed spinning solutions with different mass ratios

电压 22 kV、接收距离 10 cm。从图 5 可以看出,SA 中 O—H 的伸缩振动特征峰,以及非对称的和对称的—COO—伸缩振动特征峰,分别位于 3 318、1 595、1 405  $\text{cm}^{-1}$  处<sup>[14]</sup>;PVA 纳米纤维膜中 O—H、C—H 的伸缩振动特征峰分别在 3 305  $\text{cm}^{-1}$  和 2 936  $\text{cm}^{-1}$  处<sup>[15]</sup>。可见,SA 与 PVA 共混后,PVA/SA 复合纳米纤维中 O—H 基团峰变得更宽,说明 PVA 的羟基与 SA 的羟基或羧基形成了新的氢键<sup>[16]</sup>。

## 2.6 XRD 分析

图 6 为 PVA 纳米纤维膜 (PVA 质量分数 8%) 及 PVA/SA 复合膜 (PVA 溶液和 SA 溶液质量比 9:1) 的 XRD 谱图。从图 6 可以看出:PVA 纳米纤维膜在 19.2° 处有一个显著的特征峰,这与 PVA 大分子中存在较强的分子间氢键作用和分子内氢键作用有关;添加 SA 后,PVA/SA 复合膜在 19.2° 处的衍射峰强度降低,峰形变宽,说明

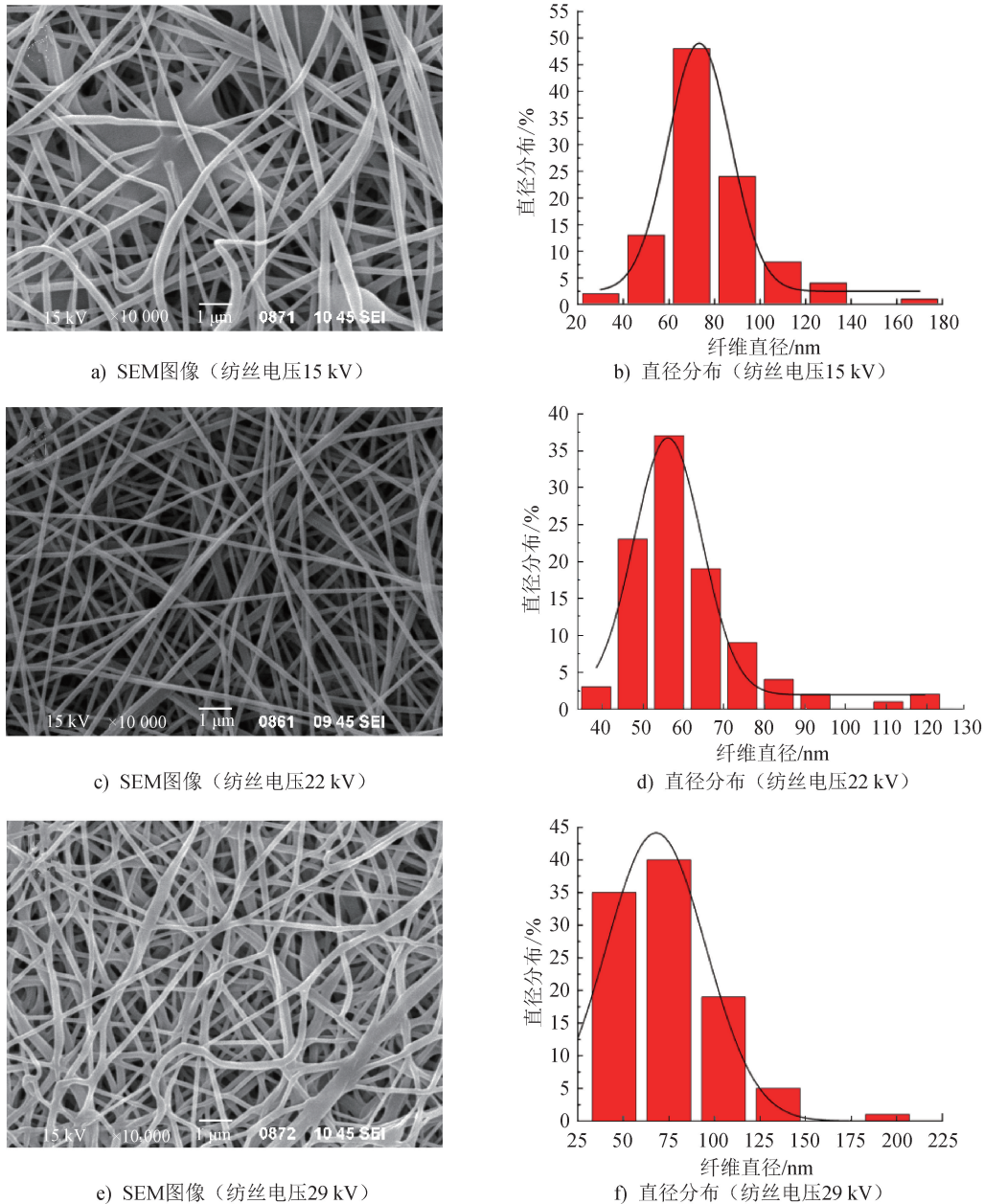


图3 采用不同纺丝电压制备的PVA/SA复合纳米纤维的SEM图像和直径分布

Fig. 3 SEM images and diameter distribution of PVA/SA composite nanofibers prepared at different spinning voltages

SA的加入降低了PVA的结晶度<sup>[17]</sup>,且经过计算发现结晶度由28%降低到20%,这与PVA大分子上的羟基和SA分子上的羧基或羟基发生了作用形成了氢键有关。总之,PVA的加入破坏了SA分子间较强的作用力及其结晶结构,提高了SA的静电纺丝性能<sup>[18]</sup>。

### 2.7 动态水接触角分析

图7与图8分别反映了PVA/SA复合膜(PVA溶液与SA溶液质量比9:1、纺丝电压22 kV、接收距

离10 cm)及其交联膜的水接触角随时间的变化情况。从图7和图8可以看出:随着时间的延长,PVA/SA复合膜水接触角下降迅速,其表现出较强的亲水性;而经过氯化钙处理得到的PVA/SA交联膜亲水性能下降,其在接触的前6 s内,水接触角均在90°以上,原因与氯化钙溶液处理得到的PVA/SA交联膜表面有凝胶层有关。该凝胶层因钙离子与SA分子中的羧基、羟基形成了配位键而获得了一种“蛋-盒”交联结构。此外,SA分子和PVA大分子相

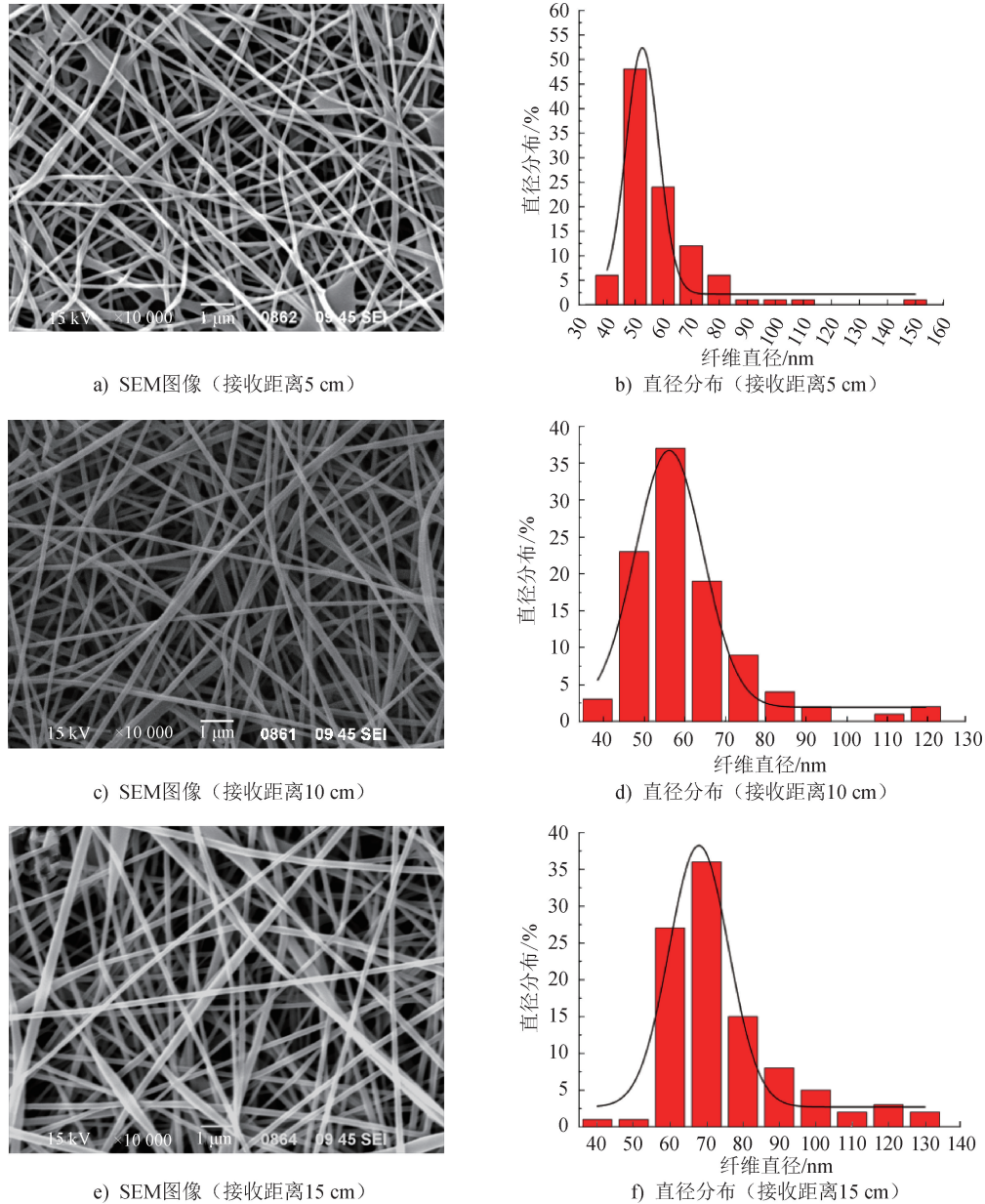


图 4 采用不同接收距离制备的 PVA/SA 复合纳米纤维的 SEM 图像和直径分布

Fig. 4 SEM images and diameter distribution of PVA/SA composite nanofibers prepared at different receiving distances

互缠绕,这限制了 PVA 大分子结构中羟基的运动,进一步影响了 PVA/SA 交联膜的亲水性能<sup>[19]</sup>。

### 3 结论

SA 水溶液难以单独进行静电纺丝。将 SA 与 PVA 共混,通过改善分子间的相互作用,提高分子链段的缠结度,实现 SA 溶液的静电纺丝。利用 SEM 观察发现,纺丝电压和接收距离过大或过小都不利于 PVA/SA 复合纳米纤维的形成。PVA/SA 复

合膜的最佳静电纺丝工艺参数为质量分数为 8% 的 PVA 溶液与质量分数为 2% 的 SA 溶液质量比 9:1、纺丝电压 22 kV、接收距离 10 cm。在此条件下纺丝过程连续,纺丝效果及纤维形貌最佳,即纺制的纤维表面光滑,直径分布集中,无串珠和珠粒。XRD 测试结果显示:采用最佳静电纺丝工艺参数制备的 PVA/SA 复合膜在 19.2° 处存在与 PVA 同型的结晶峰,且未发现明显的其他峰,说明加入 SA 没有形成新的晶体结构,同时 PVA/SA 复合膜中 PVA 结晶峰明显减弱,说明其结晶度有所降低;水接触角测

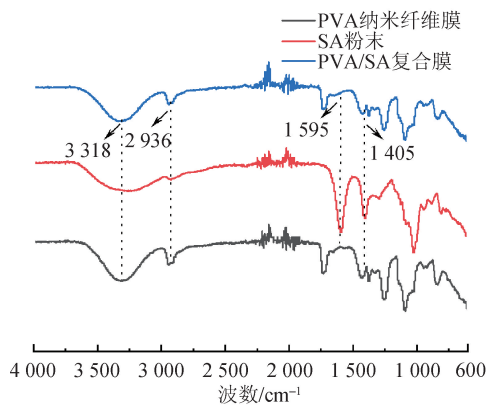


图5 SA粉末、PVA纳米纤维膜及PVA/SA复合膜的红外光谱

Fig. 5 Infrared spectra of SA powder, the PVA nanofiber membrane and PVA/SA composite nanofiber membrane

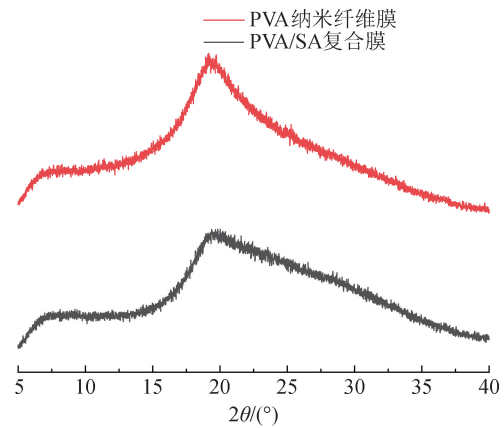


图6 PVA纳米纤维膜及PVA/SA复合膜的XRD图谱

Fig. 6 XRD spectra of the PVA nanofiber membrane and PVA/SA composite nanofiber membrane

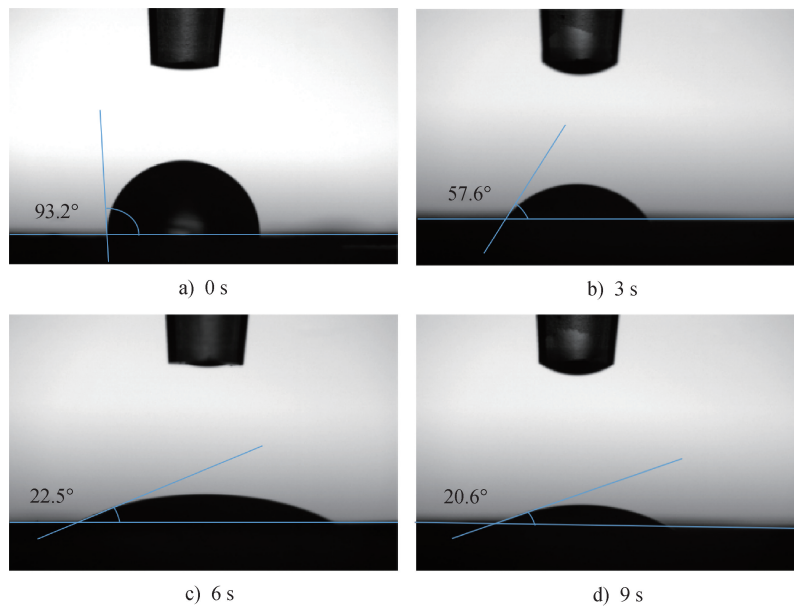


图7 PVA/SA复合膜水接触角

Fig. 7 Water contact angles of the PVA/SA composite nanofiber membrane

试结果显示,PVA/SA复合膜表现出更强的亲水性,而PVA/SA交联膜疏水性更佳。



参考文献

[ 1 ] 雷红娜,王迎,李金环. 聚乙烯醇/海藻酸钠共混液的静电纺丝[J]. 上海纺织科技, 2018, 46(2): 22-24.

[ 2 ] 钱洋,张璐,李晨阳,等. 静电纺海藻酸钠复合纳米纤维膜制备及其性能[J]. 纺织学报, 2024, 45(8): 18-25.

[ 3 ] ANGEL N, GUO L P, YAN F, et al. Effect of processing parameters on the electrospinning of cellulose acetate studied by response surface methodology [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2020, 2: 100015.

[ 4 ] 黄凯聪,韩华,赵文静,等. 水凝胶纤维的制备及其抗菌性能研究[J]. 产业用纺织品, 2021, 39(3): 24-30.

[ 5 ] FU S, THACKER A, SPERGER D M, et al. Relevance of rheological properties of sodium alginate in solution to

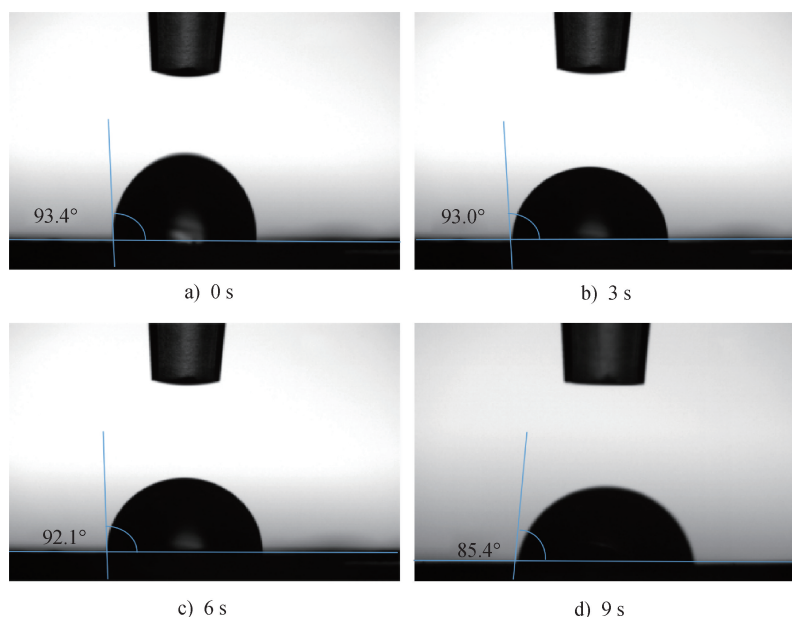


图 8 PVA/SA 交联膜水接触角

Fig. 8 Water contact angles of the PVA/SA cross-linked composite nanofiber membrane

- calcium alginate gel properties[J]. *AAPS PharmSciTech*, 2011, 12(2): 453-460.
- [ 6 ] PARSIMEHR H, EHSANI A. Algae-based electrochemical energy storage devices[J]. *Green Chemistry*, 2020, 22(23): 8062-8096.
- [ 7 ] ZHANG W, ZHAO Z D, LEI Y. Flame retardant and smoke-suppressant rigid polyurethane foam based on sodium alginate and aluminum diethylphosphite [J]. *Designed Monomers and Polymers*, 2021, 24(1): 46-52.
- [ 8 ] ZHAO S Z, XUE S M, LI L T, et al. A comprehensive evaluation of PVA enhanced polyamide nanofiltration membranes: additive versus interlayer[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 660: 130870.
- [ 9 ] 杨璧玲. 海藻酸盐纤维敷料及其纤维制备技术[J]. *产业用纺织品*, 2022, 40(4): 1-6.
- [ 10 ] KAMACI U D, PEKSEL A. Enhanced catalytic activity of immobilized phytase into polyvinyl alcohol-sodium alginate based electrospun nanofibers [J]. *Catalysis Letters*, 2021, 151(3): 821-831.
- [ 11 ] 刘百荷, 韩鹏举, 于博, 等. 聚酰亚胺纳米纤维耐高温复合滤材的制备及其性能[J]. *纺织高校基础科学学报*, 2022, 35(4): 29-37.
- [ 12 ] TOPUZ F, UYAR T. Electrospinning of cyclodextrin nanofibers: the effect of process parameters[J]. *Journal of Nanomaterials*, 2020, 2020(3): 7529306.
- [ 13 ] MOOKALA P, REDDYS R B, LEE Y J, et al. Using artificial neural networks to model and interpret electrospun polysaccharide (Hylon VII starch) nanofiber diameter [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(11): 50014.
- [ 14 ] CHEN Y B, WANG Y X, LI Z, et al. A flame retarded polymer-based composite solid electrolyte improved by natural polysaccharides[J]. *Composites Communications*, 2021, 26: 100774.
- [ 15 ] ABDELGHANY A M, AYAAD D M, MAHMOUD S M. Antibacterial and energy gap correlation of PVA/SA biofilms doped with selenium nanoparticles [J]. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2020, 10(5): 6236-6244.
- [ 16 ] 陈茹, 李帅, 陈泽帅. PVA/海藻酸钠/TiO<sub>2</sub> 纳米纤维膜的制备及其抗菌性能[J]. *上海纺织科技*, 2023, 51(2): 57-61.
- [ 17 ] 唐志敏, 李彦, 王璐. 载有  $\epsilon$ -聚赖氨酸的纳米纤维膜的制备及其抗菌性能评价[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2021, 47(6): 22-28.
- [ 18 ] ISLAM M S, KARIM M R. Fabrication and characterization of poly(vinyl alcohol)/alginate blend nanofibers by electrospinning method[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2010, 366(1/2/3): 135-140.
- [ 19 ] WANG C H, ZUO Q, WANG L J, et al. Diameter optimization of polyvinyl alcohol/sodium alginate fiber membranes using response surface methodology [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, 271: 124969.