

# 丝素蛋白搭载抗坏血酸微纳米纤维膜的制备及表征

余兴怀<sup>a</sup> 汪嘉仪<sup>a</sup> 陈继华<sup>a</sup> 杨冬逸<sup>a</sup> 李刚<sup>a,b</sup>  
苏州大学 a. 纺织与服装工程学院;  
b. 现代丝绸国家工程实验室, 江苏 苏州 215123

**摘要:**以丝素蛋白(SF)和抗坏血酸(VC)为原料,通过静电纺丝技术制备 SF/VC 微纳米纤维膜,并探究其基本性能,评估其抗氧化性和抑制黑色素生成的能力。结果表明,当 SF 溶液质量分数为 25%, $V(\text{SF 溶液}):V(\text{VC 溶液})=7:1$ ,静电纺丝电压为 13~15 kV,纺丝液推进速度为 6 mL/h 时,能够获得表面光滑细腻的 SF/VC 微纳米纤维膜。反应时间为 20 min 时,40 mg/mL 的 SF/VC 微纳米纤维膜上清液溶液对 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)自由基的清除率达 $(74.4 \pm 1.8)\%$ ,具有较好的抗氧化性能。该膜对酪氨酸酶的抑制率达 59.73%,能有效抑制黑色素的生成,呈现出良好的美白效果。

**关键词:**丝素蛋白(SF);抗坏血酸(VC);静电纺丝;微纳米纤维膜;自由基清除率;酪氨酸酶抑制率

中图分类号:TS 141.8

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2025)12-0013-08

## Preparation and characterization of silk fibroin micro-nanofiber membrane loaded with ascorbic acid

Yu Xinghuai<sup>a</sup>, Wang Jiayi<sup>a</sup>, Chen Jihua<sup>a</sup>, Yang Dongyi<sup>a</sup>, Li Gang<sup>a,b</sup>

a. College of Textile and Clothing Engineering;

b. National Engineering Laboratory for Modern Silk, Soochow University, Suzhou 215123, Jiangsu, China

**Abstract:** SF/VC micro-nanofiber membranes were fabricated using silk fibroin (SF) and ascorbic acid (VC) via electrospinning. The basic properties of the membranes were explored, and their antioxidant capacity and melanin-inhibiting effects were assessed. It was found that uniform and smooth SF/VC micro-nanofiber membranes could be successfully obtained under the following conditions: a 25% mass fraction for the SF solution, a volume ratio of SF to VC solution of 7:1, an electrospinning voltage of 13–15 kV, and a solution feed rate of 6 mL/h. When the reaction time was 20 min, the 40 mg/mL SF/VC micro-nanofiber membrane supernatant showed a  $(74.4 \pm 1.8)\%$  scavenging rate against DPPH free radicals, showing good antioxidant performance. Furthermore, the membrane achieved a 59.73% inhibition rate against tyrosinase, effectively suppressing melanin synthesis and exhibiting a promising whitening effect.

**Keywords:** silk fibroin (SF); ascorbic acid (VC); electrospinning; micro-nanofiber membrane;

基金项目:国家自然科学基金面上项目(82374295);国家重点研发计划(2021YFE0111100)

收稿日期:2025-06-03

作者简介:余兴怀,男,2003年生,在读本科生,主要研究方向为生物医用纺织材料

通信作者:李刚,教授,博士生导师,研究方向为生物医用纺织材料,tcligang@suda.edu.cn

free radical scavenging rate; inhibition rate against tyrosinase

近年来,随着人们对健康环保产品的需求日益增长,中国非织造布市场规模快速增长。根据 Research Nester 公布的数据,2024 年全球非织造布市场规模超过 548.10 亿美元,预计到 2037 年将突破 1 601.90 亿美元。2023 年,全球面膜市场规模达 207.4 亿美元,其中中国面膜市场占据了约 43.5% 的份额<sup>[1]</sup>。非织造布面膜凭借便捷以及能快速改变肤质的特性,成为美容护肤领域的主流产品。贴片式面膜是面膜的常见类型,其以固体基材为载体,使用时仅需在面部敷置约 20 min,即可发挥短期集中护理或清洁的功效<sup>[2]</sup>。面膜基材的材质对面膜的应用效果至关重要,其会直接影响面膜保湿、美白等功效的发挥<sup>[3]</sup>。

复合纤维面膜是一种常见的面部护理产品,其纤维材料通常由 2 种及 2 种以上聚合物组成,每种聚合物都有不同的功能和特性,旨在实现更全面的皮肤护理效果。Gao 等<sup>[4]</sup>以胶原蛋白肽(CP)/丝素蛋白(SF)为原料,通过静电纺丝技术制备了一种面膜布与精华液一体化的面膜。试验结果显示,当 CP 与 SF 的总质量分数为 30%,且  $m(\text{CP}):m(\text{SF})$  为 5:2 时,面膜具有最佳的保湿性能。这种复合面膜融合了天然蚕丝面膜和可溶凝胶面膜的优点,无需额外添加防腐剂,成本低廉。然而,其精华成分相对单一,相关研究较少,无法满足市场的需求,因此,有待展开进一步的研究和改进。

丝素蛋白是一种由桑蚕丝腺分泌的天然高分子纤维蛋白,具有良好的吸水性、力学性能及生物相容性,可降解,无污染。有学者研究发现,丝素蛋白能够搭载姜黄素等药物成分,并通过酶解作用释放出药物分子<sup>[5-8]</sup>。这是由于 SF 分子结构中存在着大量的  $\beta$ -折叠,这赋予了 SF 良好的包封效率和可控的释放能力。此外,可根据需求进一步调控  $\beta$ -折叠的尺寸与结构,控制其对药物的释放<sup>[9]</sup>。抗坏血酸又名维生素 C(VC),是一种具有抗氧化性的水溶性维生素,能够通过抑制酪氨酸酶的活性减缓酪氨酸的转化速度,进而减少黑色素的生成。同时,抗坏血酸的抗氧化性可使已经形成的黑色素转化为黑色素前体物质,进而达到美白功效<sup>[10]</sup>。此外,抗坏血酸还能够促进氨基酸的转运和吸收,为胶原蛋白的合

成提供所需的原料,进而有效提升胶原蛋白的合成效率。

本研究基于静电纺丝技术,通过将抗坏血酸负载于丝素蛋白微纳米纤维膜中,制备具有药物缓释功能的 SF/VC 复合微纳米纤维膜<sup>[5,11]</sup>,通过对其微观形貌、分子结构、力学性能、亲水亲肤性、抗氧化性及美白功效等进行测试和分析,探究其在皮肤健康管理领域的应用价值。

## 1 试验部分

### 1.1 材料与仪器

桑蚕丝(4A 级,浙江嵊州协和丝绸有限公司);无水碳酸钠(分析纯,江苏强盛功能化学股份有限公司);溴化锂(分析纯,上海阿拉丁试剂有限公司);聚乙二醇 20000(分析纯,上海源叶生物科技有限公司);抗坏血酸(分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司);透析袋(截留分子量 3 500 Da,美国光谱医学公司);1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、无水乙醇、磷酸盐(PBS)缓冲液(pH 值为 6.8)、左旋多巴酪氨酸酶(分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司)。

Milli-Q Direct 水纯化系统(美国 Millipore 公司);XS105DU 型分析天平(瑞士 Mettler Toledo 公司);JDF05 型高压静电纺丝机(长沙纳仪仪器科技有限公司);DHG-9123A 型电热恒温干燥箱(上海精宏实验设备有限公司);HJ-6B 型恒温多头磁力搅拌器(江苏科析仪器有限公司);S4800 型扫描电子显微镜(日本 Hitachi 公司);VHX-1000 型超景深 3D 显微镜(日本 Keyence 公司);Nicolet 5700 型傅立叶变换红外光谱仪(美国 Nicolet 公司)。

### 1.2 试验过程

#### 1.2.1 丝素蛋白溶液的制备

取 30 g 桑蚕丝加入 12 L 的去离子水中加热煮沸,再加入 25.44 g 无水碳酸钠使丝胶蛋白充分溶解,然后使用去离子水充分搓洗以去除丝胶蛋白,晾干后得到丝素蛋白纤维。接着,将丝素蛋白纤维浸润在 9.3 mol/L 的 LiBr 溶液中,于 60 °C 条件下溶解 4 h,其间每隔 1 h 摇匀 1 次。然后将溶液倒入透析

袋(截留分子量 3 500 Da)并置于去离子水中透析 36 h,整个透析过程换水 5 次<sup>[12]</sup>。最后使用质量分数为 15%的聚乙二醇 20000 溶液进行浓缩处理 36 h,得到质量分数为 25%的丝素蛋白溶液<sup>[13-14]</sup>。

### 1.2.2 抗坏血酸溶液的制备

称取 0.2 g 的抗坏血酸粉末,使用去离子水定容至 10 mL,得到质量浓度为 0.02 g/mL 的抗坏血酸溶液。

### 1.2.3 SF/VC 微纳米纤维膜的制备

先按照  $V(\text{SF 溶液}):V(\text{VC 溶液})=7:1$  的比例混合均匀,得到静电纺丝溶液<sup>[15]</sup>。然后,在室温条件下进行静电纺丝,即将装有纺丝液的注射器连接到推进器上,金属针头采用医用 7 号针头(内径为 0.21 mm),设置推进速度为 6 mL/h、接收距离为 15 cm、电压为 13~15 kV。所得 SF/VC 微纳米纤维膜由锡箔覆盖的接地收集器接收。同样,按此方法,利用制备的 SF 溶液制备纯 SF 微纳米纤维膜。

## 1.3 测试与表征

### 1.3.1 微观形态

将微纳米纤维膜样品置于载物台导电胶上,样品表面喷金 90 s 后,通过 S4800 型扫描电子显微镜观察样品的表面微观结构与纤维形貌。

将微纳米纤维膜样品放置于 VHX-1000 型超景深 3D 显微镜的样品台上,观察样品的宏观立体形态与整体均匀性。

### 1.3.2 分子结构

基于透射方法,采用 Nicolet 5700 型傅立叶变换红外光谱仪测试 SF/VC 微纳米纤维膜的红外吸收光谱,并与纯 SF 微纳米纤维膜、抗坏血酸粉末进行比较<sup>[16]</sup>。

### 1.3.3 力学性能

对 SF/VC 微纳米纤维膜和纯 SF 微纳米纤维膜进行拉伸测试。具体为,将样品剪成 2 cm×5 cm 的长条,设置夹持距离为 30 mm、拉伸速度为 10 mm/min,测试环境为相对湿度 65%、温度 25 °C<sup>[17]</sup>。

### 1.3.4 亲水性

将制得的 SF/VC 微纳米纤维膜样品裁剪成 5 mm×5 mm 的正方形,水平放入盛有 5 mL 去离子水的玻璃培养皿中,分别在 1、5 和 12 min 时观察样品在去离子水中的水解情况。

### 1.3.5 亲肤性

在待测者手背上均匀喷洒一层去离子水后,将裁剪的 2 cm×2 cm 的 SF/VC 微纳米纤维膜样品平放在试验者手背上,观察 10、20 和 30 s 时微纳米纤维膜样品与手背皮肤的贴合程度。

### 1.3.6 抗氧化性

DPPH 自由基法是一种经典且广泛应用的抗氧化能力评估方法。DPPH 自由基作为一种稳定的含氮自由基,其乙醇溶液在 517 nm 波长处有强吸收峰,吸光度值与溶液浓度呈线性关系。抗氧化剂与 DPPH 自由基反应会导致溶液在 517 nm 波长处的吸光度下降。本研究将称取一定质量的 DPPH,用体积分数为 95%的乙醇溶液定容至 50 mL,得到 6 mmol/L 的 DPPH 乙醇溶液,稀释 10 倍后得到 0.6 mmol/L 的 DPPH 乙醇溶液备用<sup>[18]</sup>。由于 DPPH 见光易分解,因此需现配现用,配制的 DPPH 乙醇溶液应在 2 h 内使用完毕。接着,称取 0.5 g 的 SF/VC 微纳米纤维膜样品加入 40 °C 的蒸馏水中,定容至 5 mL,充分搅拌均匀后静置 15 min,接着以 4 500 r/min 的转速离心 5 min,完毕后分别取不同质量的上清液于 10 mL 的容量瓶中,加入 40 °C 蒸馏水定容、混匀、静置,制得不同质量浓度的上清液溶液。取 2 mL 不同质量浓度的上清液溶液与 4 mL 0.6 mmol/L 的 DPPH 乙醇溶液加入同一试管中,混合液总体积为 6 mL,混匀后室温下分别放置 10、15、20 min,分别测量混合溶液在 517 nm 波长处的吸光度。并采用同样的方法,将 2 mL 不同质量浓度的上清液溶液与 4 mL 体积分数为 95%的乙醇溶液混合,将 4 mL 0.6 mmol/L 的 DPPH 乙醇溶液与 2 mL 蒸馏水混合,分别测量混合液在 517 nm 波长处的吸光度。最后根据式(1)计算 DPPH 自由基的清除率( $\delta, \%$ ):

$$\delta = \left( 1 - \frac{A - A_i}{A_0} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $A$  为 4 mL 0.6 mmol/L DPPH 乙醇溶液与 2 mL 不同质量浓度的上清液溶液组成的混合液在 517 nm 波长处的吸光度; $A_i$  为 4 mL 体积分数为 95%乙醇溶液与 2 mL 不同质量浓度的上清液溶液组成的混合液在 517 nm 波长处的吸光度; $A_0$  为 4 mL 0.6 mmol/L DPPH 的乙醇溶液与 2 mL 蒸馏水组成的混合液在 517 nm 波长处的吸光度<sup>[18]</sup>。

1.3.7 美白功效

酪氨酸酶催化生成黑色素的过程是皮肤变黑的关键机制,其主要发生在酪氨酸转化为多巴,以及多巴转化为多巴醌的反应中。多巴醌为有色物质,是黑色素生成过程中的重要中间产物。多巴醌可使用分光光度计在波长 475 nm 处进行检测。

根据表 1,将 SF 微纳米纤维膜溶液上清液或

SF/VC 微纳米纤维膜溶液上清液、pH 值为 6.8 的 PBS 缓冲液和 0.01 mol/L 的多巴溶液吸取至 10 mL 的比色管中,充分混合后于室温下静置 15 min,然后加入质量浓度为 70 μg/mL 的酪氨酸酶溶液,以保持反应液总体积在 5 mL。混匀后静置 5 min,使用分光光度计在波长 475 nm 处测量各反应液的吸光度<sup>[19]</sup>。

表 1 反应液成分组成

Tab. 1 Composition of reaction solutions

反应液编号	微纳米纤维膜溶液上清液/mL	PBS 缓冲液/mL	多巴溶液/mL	酪氨酸酶溶液/mL
1 <sup>#</sup>	0	3.5	1.0	0.5
2 <sup>#</sup>	0	4.0	1.0	0
3 <sup>#</sup>	1.0	2.5	1.0	0.5
4 <sup>#</sup>	1.0	3.0	1.0	0

然后,根据式(2)计算酪氨酸酶活性抑制率(τ,%):

$$\tau = \frac{(A_1 - A_2) - (A_3 - A_4)}{A_1 - A_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: A<sub>1</sub> 为 1<sup>#</sup>反应液的吸光度,含酪氨酸酶但不含微纳米纤维膜;

A<sub>2</sub> 为 2<sup>#</sup>反应液的吸光度,不含酪氨酸酶也不含微纳米纤维膜;

A<sub>3</sub> 为 3<sup>#</sup>反应液的吸光度,同时含酪氨酸酶和微纳米纤维膜;

A<sub>4</sub> 为 4<sup>#</sup>反应液的吸光度,含微纳米纤维膜但不含酪氨酸酶。

每种微纳米纤维膜对酪氨酸酶活性的抑制率测试,平行试验不少于 3 次。

2 结果与讨论

2.1 微观形貌

高压静电纺丝技术制备的 SF/VC 微纳米纤维膜的表现形貌如图 1a)所示,可以看出,在丝素蛋白的聚集和交联作用下,SF/VC 微纳米纤维膜呈现出纵横交错的网状结构。通过高分辨率的图 1b)可以观察到,纤维表面光滑,趋直性良好,少部分纤维呈现弯曲状态,纤维没有出现串珠状,但有少量纺锤体形,纤维整体形貌较理想。图 1c)为经过拟合分析的纳米纤维直径分布图,可以看出,纤维平均直径在(3.47±0.21) μm,且直径分布较为集中,纺丝液具有良好的可纺性。

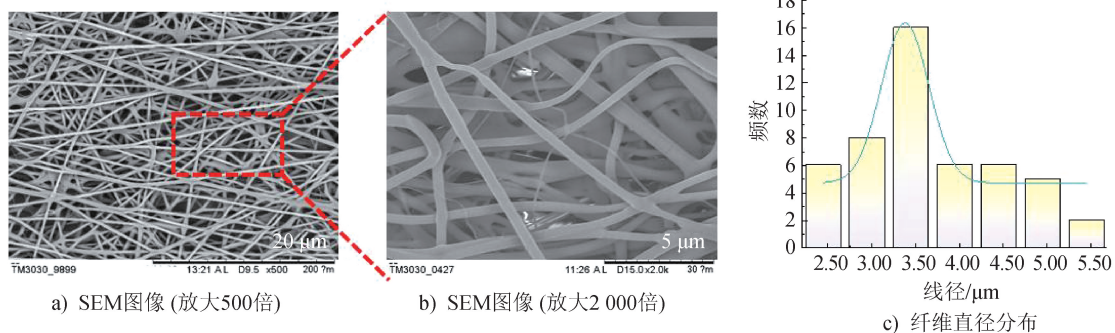


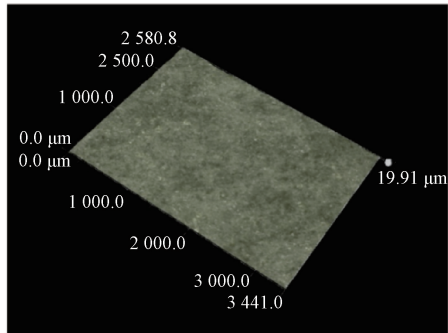
图 1 SF/VC 微纳米纤维膜 SEM 照片及纤维直径分布

Fig. 1 SEM photos and fiber diameter distribution of SF/VC micro-nanofiber membranes

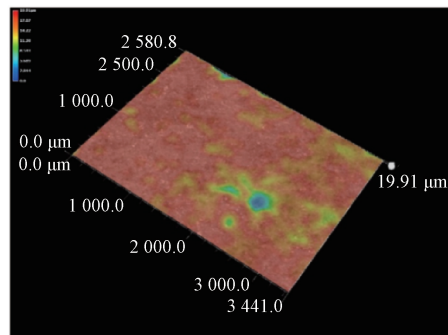
对 SF/VC 微纳米纤维膜和 SF 微纳米纤维膜进行超景深三维可视化采集,结果如图 2 所示,可以看

出,搭载抗坏血酸后,SF/VC 微纳米纤维膜表面孔隙的平均深度(20 μm)较 SF 微纳米纤维膜的平均

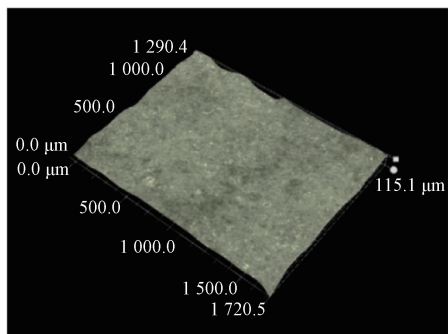
深度(115  $\mu\text{m}$ )减少了近 83%,说明抗坏血酸的引入成功提高了微纳米纤维膜的平整度,减少了开放孔洞及微裂纹,进而提高了微纳米纤维膜的表面品质。



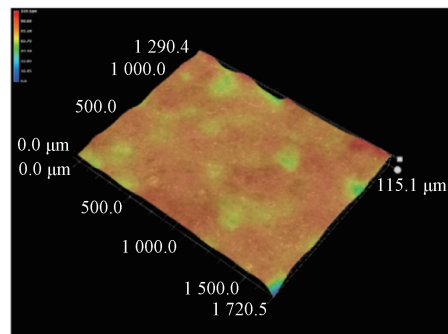
a) SF/VC微纳米纤维膜的显微形貌三维视图



b) SF/VC微纳米纤维膜的显微形貌三维高度图



c) SF微纳米纤维膜的显微形貌三维视图



d) SF微纳米纤维膜的显微形貌三维高度图

图 2 微纳米纤维膜三维微观图像

Fig. 2 Three-dimensional microscopic images of micro-nanofiber membranes

## 2.2 红外光谱分析

丝素蛋白二级结构可以用酰胺 I 带表征,其中最显著的特征峰出现在  $1\,661\text{ cm}^{-1}$  处,对应丝素蛋白中的  $\alpha$ -螺旋结构;除此之外,还有  $1\,674\text{ cm}^{-1}$  和  $1\,639\text{ cm}^{-1}$  处的特征峰,分别对应  $\beta$ -转角结构和无规则卷曲结构。图 3a)所示为抗坏血酸、SF 微纳米纤维膜和 SF/VC 微纳米纤维膜的红外光谱图,可以看出:抗坏血酸分子的吸收峰主要在  $1\,750\sim 1\,792\text{ cm}^{-1}$  和  $1\,031\sim 1\,318\text{ cm}^{-1}$ ,分别为羧基( $-\text{COOH}$ )的伸缩振动和羟基( $-\text{OH}$ )的伸缩振动。SF/VC 微纳米纤维膜和 SF 微纳米纤维膜的吸收峰存在明显的差异。与 SF 微纳米纤维膜相比,SF/VC 微纳米纤维膜在  $1\,200\sim 1\,700\text{ cm}^{-1}$  出现了显著的特征峰,表明该膜呈现出了无规则卷曲结构,且  $\alpha$ -螺旋结构增多,蛋白质纯度降低,这与抗坏血酸具有一定的酸性,使得蛋白质分子中的肽链断裂有关。

图 3b)反应了 SF 纺丝液、SF 微纳米纤维膜及 SF/VC 微纳米纤维膜的二级结构含量,可以看出:SF 纺丝液通过静电纺丝加工成微纳米纤维膜后, $\beta$ -折叠含量明显上升,这说明静电纺丝使丝素蛋白发生了由螺旋/无规线团向  $\beta$ -折叠的构象转变,其分子链变得更加稳定。但加入抗坏血酸后, $\beta$ -折叠的含量有所减少, $\alpha$ -螺旋结构和无规卷曲结构含量相对增加,表明 SF/VC 微纳米纤维内部结构的结晶度有所下降,材料吸湿性提高,同时分子链的活动性增加,微纳米纤维膜的弹性和延展性得以改善。

## 2.3 力学性能

应力-应变曲线反映了材料在外加力作用下的应力与应变的关系。图 4 反映了 SF 微纳米纤维膜和 SF/VC 微纳米纤维膜的应力-应变曲线和最大拉伸强度。可以看出,SF 微纳米纤维膜的抗拉伸性强于 SF/VC 微纳米纤维膜。在初始形变阶段,SF 微纳米纤维膜的应力随应变迅速增加,纤维膜进入线性变化阶段,应力从  $1.74\text{ MPa}$  增加至屈服点  $3.51\text{ MPa}$ 。之后,材料开始显露非线性行为,应力不再与应变成正比。当应力超过丝素蛋白的极限强度时,材料到达断裂点并发生断裂,此时应力为  $5.44\text{ MPa}$ 。在这一点,曲线突然下降,应变急剧增加。SF/VC 微纳米纤维膜与纯 SF 微纳米纤维膜有着相似的应力-应变曲线特征,其趋势大体相同,但是与纯 SF 微纳米纤维膜断裂强度( $5.44\text{ MPa}$ )相

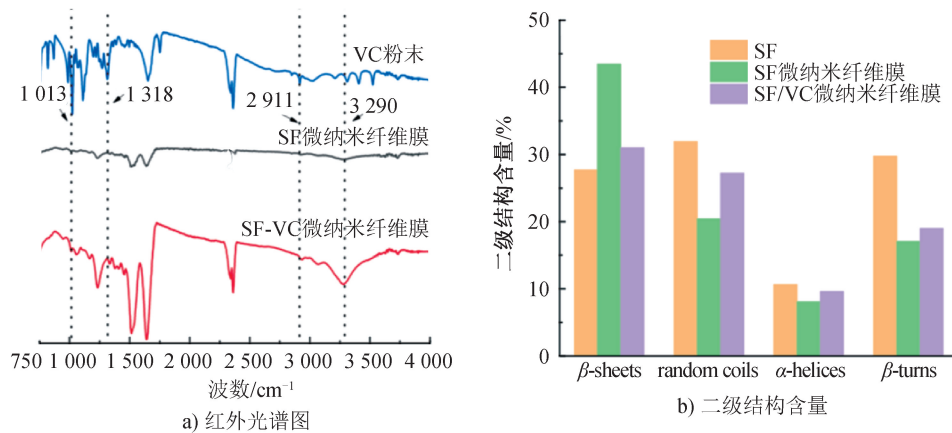


图3 红外光谱分析结果  
Fig. 3 Results of infrared spectroscopy analysis

比, SF/VC 微纳米纤维膜的断裂强度降低到了 4.39 MPa, 断裂伸长率有一定程度的增加。这表明抗坏血酸的加入在一定程度上影响了纤维膜的力学性能。经大量试验研究发现, 当使用的 SF 溶液质量分数在 25%,  $V(\text{SF 溶液}) : V(\text{VC 溶液}) = 7 : 1$ , 静电

纺丝电压为 13~15 kV、纺丝液推进速度为 6 mL/h 时, SF/VC 微纳米纤维膜的力学性能较好, 其具备一定的拉伸强度和弹性, 这有助于防止面膜撕裂, 帮助面膜贴合面部曲线, 增大面膜与皮肤的接触面积, 以充分发挥搭载的抗坏血酸的功效。

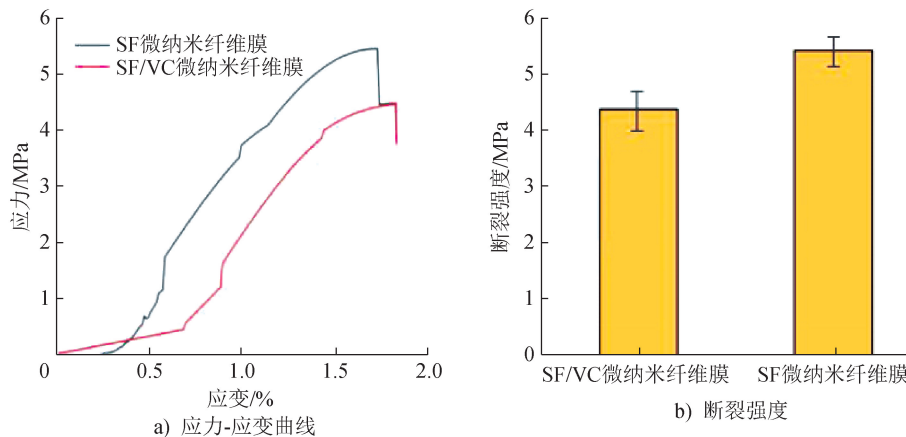


图4 SF 微纳米纤维膜和 SF/VC 微纳米纤维膜力学性能测试结果  
Fig. 4 Mechanical property test results of SF micro-nanofiber membrane and SF/VC micro-nanofiber membrane

## 2.4 亲水亲肤性

考虑到面膜产品的实际使用特性, 本项试验设定的时间较短, 且未进行振荡、离心等操作。整个试验过程较为平稳, 样品形态保持较好, 如图 5 所示: 从第 5 min 开始, SF/VC 微纳米纤维膜样品在去离子水中变得透明, 至第 12 min 时变得完全透明, 但样品并没有完全溶解于去离子水中。这一现象表明, SF/VC 微纳米纤维膜具备较高的亲水性, 水分能够快速穿过膜表面, 且不会因过度吸水而导致自身原有结构和性能发生较大改变。

此外, 样品的水解过程稳定, 这与纺丝溶液浓度较高, 静电纺丝得到的丝素蛋白结构更加稳定有关。

作为面膜产品, 为利于活性成分的高效渗透与均匀释放, 提升护肤功效, 面膜产品要求质地亲肤, 能够紧密贴附于皮肤细小纹路处, 与皮肤高度贴合且不产生气泡。由图 6 可以观察到, SF/VC 微纳米纤维膜样品质地柔软, 30 s 内便能完全贴合于皮肤表面, 并呈透明状, 且没有引起皮肤过敏或造成刺激, 这体现了样品良好的亲肤性。

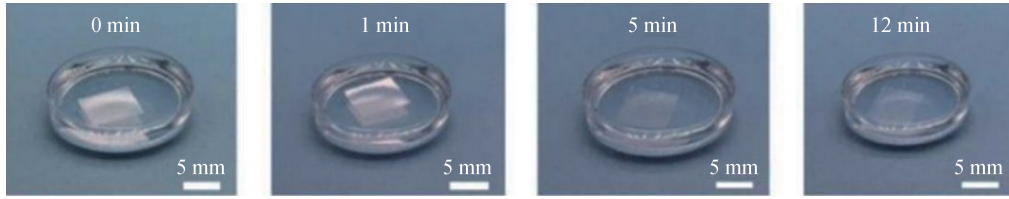


图 5 SF/VC 微纳米纤维膜亲水性测试

Fig. 5 Hydrophilicity test of SF/VC micro-nanofiber membranes

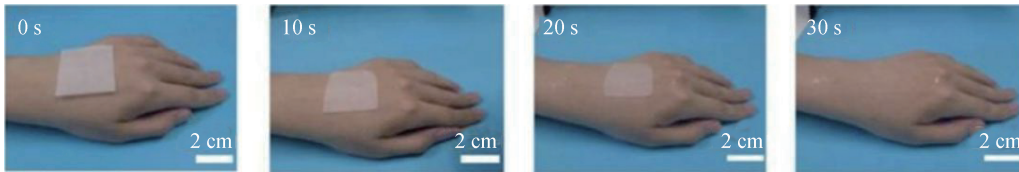


图 6 SF/VC 微纳米纤维膜亲肤性测试

Fig. 6 Skin-friendliness test of SF/VC micro-nanofiber membranes

## 2.5 DPPH 自由基清除率

如图 7 所示,随着 SF/VC 微纳米纤维膜溶液上清液的质量浓度不断升高,DPPH 自由基清除率不断提升;反应时间在 10、15 和 20 min 时,DPPH 自由基清除率表现较为稳定。其中,当反应时间为 20 min 时,上清液溶液的质量浓度为 20 mg/mL,DPPH 自由基清除率为  $(52.6 \pm 1.2)\%$ ;上清液溶液的质量浓度为 30 mg/mL,DPPH 自由基清除率达  $(61.5 \pm 2.3)\%$ ;上清液溶液的质量浓度提升至 40 mg/mL,DPPH 自由基清除率高达  $(74.4 \pm 1.8)\%$ 。说明,SF/VC 微纳米纤维膜能够有效清除 DPPH 自由基,且 DPPH 自由基清除率与其含量成正相关,进一步反映了 SF/VC 微纳米纤维膜具有良好的抗氧化性能。此外,由于面膜产品使用时间一般较为短暂且平时都保存于精华液中,抗坏血酸短时间内不易被分解,因此,SF/VC 微纳米纤维膜能在短时间内维持相对稳定的抗氧化性能。

## 2.6 酪氨酸酶抑制率

SF 微纳米纤维膜和 SF/VC 微纳米纤维膜对酪氨酸酶活性的抑制率如图 8 所示。试验结果表明,丝素蛋白本身对酪氨酸酶有一定的抑制作用,但是抑制率较低,平均抑制率为 39.08%;当丝素蛋白搭载抗坏血酸时,SF/VC 微纳米纤维膜对酪氨酸酶的抑制率显著提高,平均抑制率达 59.73%。由此可以得出,SF/VC 微纳米纤维膜对酪氨酸酶有良好的抑制效果,可用于美白面膜产品的开发。

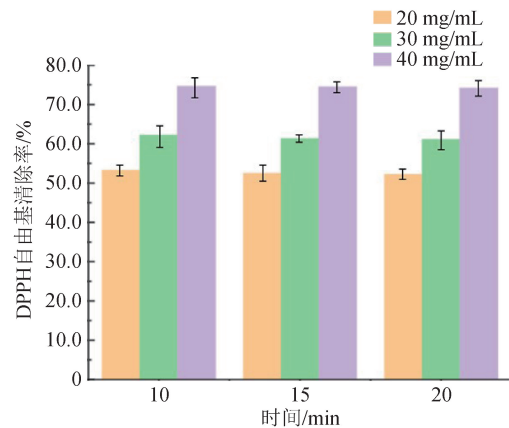


图 7 不同质量浓度的 SF/VC 微纳米纤维膜溶液上清液的 DPPH 自由基清除率

Fig. 7 DPPH free radical scavenging rate of supernatant of SF/VC micro-nanofiber membrane solutions with different mass concentrations

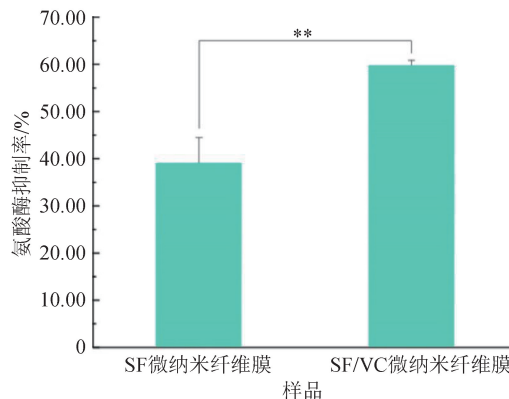


图 8 SF 微纳米纤维膜和 SF/VC 微纳米纤维膜的酪氨酸酶抑制率

Fig. 8 Inhibition rate against tyrosinase of SF micro-nanofiber membrane and SF/VC micro-nanofiber membrane

### 3 结论

本研究采用高压静电纺丝技术成功制备了丝素蛋白/抗坏血酸(SF/VC)微纳米纤维膜,结果表明所制备的微纳米纤维光滑平直、细度均匀,平均直径在 $(3.47 \pm 0.21) \mu\text{m}$ 。加入抗坏血酸后,SF结构中 $\beta$ -折叠含量下降,纤维膜的弹性和延展性得到改善。SF/VC微纳米纤维膜水解过程中形态稳定且质地柔软,与皮肤贴合良好。在功效性测试方面,SF/VC微纳米纤维膜对自由基的清除率可达 $(74.4 \pm 1.8)\%$ ,对酪氨酸酶的平均抑制率达 $59.73\%$ ,能有效抑制黑色素的生成。相较于传统的贴片面膜,SF/VC微纳米纤维膜表现出良好的抗氧化和美白功效,这有助于改善肌肤的水分含量和质地,同时减轻自由基对皮肤的损伤,规避使用可能导致皮肤过敏的防腐剂等成分,有望在医美和生物医药领域应用。此外,由于VC能清除创面微环境中的活性氧,减轻炎症反应,同时促进胶原蛋白的合成,加速肉芽组织形成和上皮化进程,因此,在糖尿病溃疡、烧伤、压疮等难愈性创面处,使用搭载VC的纤维膜既能保持创面透气保湿,又能通过VC的缓释发挥抗氧化修复作用,后续可进一步探究其他负载物质在皮肤健康管理领域及医用领域的潜在价值,进一步拓展该微纳米纤维膜的功能和应用。



期刊采编平台

中国知网下载

### 参考文献

- [ 1 ] 李真成. 韩国化妆品对中国出口竞争力及问题研究 [D]. 北京: 对外经济贸易大学, 2019.
- [ 2 ] 中华人民共和国工业和信息化部. 面膜: QB/T 2872—2017[S]. 北京: 中国轻工业出版社, 2017: 1-5.
- [ 3 ] 余瞻, 沙如意, 赵福权, 等. 绿色合成细菌纤维素及其在面膜基材上的应用[J]. 精细化工, 2021, 38(5): 907-913.
- [ 4 ] GAO N X, WU J, LIU Y. Preparation of a dissolved collagen peptide-silk fibroin composite fiber mask by electrospinning[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2018, 45(6): 21-28.
- [ 5 ] XIE X S, YU J, ZHAO Z Y, et al. Fabrication and drug release properties of curcumin-loaded silk fibroin nanofibrous membranes [J]. Adsorption Science & Technology, 2019, 37(5/6): 412-424.
- [ 6 ] LIU Q, ZHOU S F, ZHAO Z Y, et al. Silk fibroin/polyethylene glycol nanofibrous membranes loaded with curcumin [J]. Thermal Science, 2017, 21(4): 1587-1594.
- [ 7 ] ZU M H, MA Y, CANNUP B, et al. Oral delivery of natural active small molecules by polymeric nanoparticles for the treatment of inflammatory bowel diseases [J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2021, 176: 113887.
- [ 8 ] 孙诗锦, 于金超, 周文龙, 等. 可降解纤维材料及其应用的研究进展[J]. 产业用纺织品, 2023, 41(10): 9-17.
- [ 9 ] LIANG M D, LI F, WANG Y F, et al. Woven vascular stent-grafts with surface modification of silk fibroin-based paclitaxel/metformin microspheres [J]. Bioengineering, 2023, 10(4): 399.
- [ 10 ] 曾昕, 冉磊. 维生素 C 对皮肤健康的促进作用研究进展[J]. 现代医药卫生, 2020, 36(19): 3108-3110.
- [ 11 ] 严佳, 李刚. 医用纺织品的研究进展[J]. 纺织学报, 2020, 41(9): 191-200.
- [ 12 ] 李振轮. 一种新的金龟子绿僵菌酪氨酸蛋白磷酸酶的纯化、特性及基因克隆[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [ 13 ] WÖLTJE M, KÖLBEL A, AIBIBU D, et al. A fast and reliable process to fabricate regenerated silk fibroin solution from degummed silk in 4 hours [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(19): 10565.
- [ 14 ] 李俊婷, 杜浩, 王秉, 等. 丝素蛋白的提取与应用概述[J]. 轻纺工业与技术, 2025, 54(1): 115-120.
- [ 15 ] 唐兵兵, 刘延波. 一种含丝素蛋白的静电纺纳米纤维[J]. 非织造布, 2013, 21(3): 89-91.
- [ 16 ] 冯裕胜. 丝素蛋白基中药复方抗肿瘤肠道支架的研制[D]. 苏州: 苏州大学, 2022.
- [ 17 ] FENG Y S, HAN Z F, CHEN C, et al. Psoralea corylifolia formula extract-loaded silk fibroin/polycaprolactone fibrous membrane for the treatment of colorectal cancer [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2024, 233: 113635.
- [ 18 ] 李晓娇, 刘忆明, 段琴. 铁皮石斛抗氧化面膜的研制[J]. 保山学院学报, 2019, 38(2): 36-39.
- [ 19 ] 杨宇, 宋孟霜, 陈婕, 等. 白鲜皮抑制酪氨酸酶作用研究及其美白面膜制备[J]. 广州化工, 2021, 49(12): 88-89.