

# 基于丝胶蛋白的柔性导电薄膜的制备及电学性能研究

邹俊浩<sup>1</sup>, 罗秋兰<sup>1\*</sup>, 潘川<sup>2</sup>, 詹云飞<sup>1</sup>, 陈子晗<sup>1</sup>, 马辉<sup>2</sup>

<sup>1</sup>嘉兴南湖学院, 时尚设计学院, 浙江 嘉兴

<sup>2</sup>嘉兴学院, 材料与纺织工程学院, 浙江 嘉兴

收稿日期: 2023年9月12日; 录用日期: 2023年10月14日; 发布日期: 2023年10月25日

## 摘要

目前绿色、低碳、环保已成为时代发展的主题, 以蚕丝脱胶废水中提取的丝胶蛋白为原料, 并引入壳聚糖, 将两者按照一定比例混合后, 加入纳米碳粉分散液制成了具有一定力学性能的导电薄膜。采用控制变量法, 通过分析丝胶蛋白与壳聚糖的质量共混比、纳米碳粉的质量分数、烘干温度变化对导电薄膜的厚度、导电性、力学性能的影响, 综合得到最佳的制备工艺, 并对最佳制备工艺下的导电薄膜的柔软性、表面形貌、结构以及电学稳定性进行表征分析。结果表明: 最佳工艺下导电薄膜的抗弯刚度小, 柔性好, 添加纳米碳粉后的丝胶蛋白/壳聚糖复合薄膜成形良好, 内部分布均匀; 在拉伸不同时间以及多次弯折后, 导电薄膜的电阻有一定的变化, 但总体上变化不明显, 说明柔性导电膜具有一定的电学稳定性, 这为导电薄膜在柔性传感器和智能可穿戴领域的应用提供了一定的借鉴。

## 关键词

丝胶蛋白, 导电薄膜, 电学性能, 力学性能

# Preparation and Electrical Properties of Flexible Conductive Films Based on Sericin Protein

Junhao Zou<sup>1</sup>, Qiulan Luo<sup>1\*</sup>, Chuan Pan<sup>2</sup>, Yunfei Zhan<sup>1</sup>, Zihan Chen<sup>1</sup>, Hui Ma<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Fashion & Design, Jiaxing Nanhu University, Jiaxing Zhejiang

<sup>2</sup>College of Materials and Textiles, Jiaxing University, Jiaxing Zhejiang

Received: Sep. 12<sup>th</sup>, 2023; accepted: Oct. 14<sup>th</sup>, 2023; published: Oct. 25<sup>th</sup>, 2023

\*通讯作者。

文章引用: 邹俊浩, 罗秋兰, 潘川, 詹云飞, 陈子晗, 马辉. 基于丝胶蛋白的柔性导电薄膜的制备及电学性能研究[J]. 材料科学, 2023, 13(10): 919-930. DOI: 10.12677/ms.2023.1310101

## Abstract

At present, green, low-carbon, and environmental protection have become the theme of the development of the times. Sericin protein extracted from silk degumming wastewater was used as raw material, which were mixed with chitosan in a certain proportion. After adding nano carbon powder dispersion, a conductive film with certain mechanical properties was made. By using the control variable method, the optimal preparation process was obtained by analyzing the mass ratio of sericin protein to chitosan, the mass fraction of nano carbon powder, and the influence of drying temperature changes on the thickness, conductivity, and mechanical properties of the conductive film. The softness, surface morphology, structure, and electrical stability of the conductive film under the optimal preparation process were also characterized and analyzed. The results show that under the optimal process, the conductive film has low bending stiffness and good flexibility. The composite film with the addition of nano carbon powder has good formation and uniform internal distribution; after stretching for different times and multiple bends, the resistance of the conductive film varies to some extent, but the overall change is not significant, indicating that the flexible conductive film has a certain degree of electrical stability. This provides a certain reference for the application of conductive film in the fields of flexible sensors and intelligent wearables.

## Keywords

Sericin Protein, Conductive Thin Film, Conductivity, Mechanical Property

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着柔性传感器、柔性显示器及柔性电子材料等逐渐涌入人们视野[1], 导电薄膜以其轻便柔软、拉伸易弯曲、导电性好等特点, 其需求呈现爆炸性增长[2]。早期的导电薄膜, 尤其是占有市场主导地位的氧化铟锡(ITO)导电薄膜, 因其固有脆性、基底上方阻高、高温及真空溅射工艺等问题大大限制了其在柔性导电薄膜领域的应用[3] [4]。

近年来, 高性能导电材料如碳基材料(纳米碳粉、CNTs、Graphene)、金属纳米线(AgNW、CuNW)、导电高分子聚合物、超薄金属、金属网格等不断研发出来[5] [6] [7]。在众多材料中, 碳基材料因其优异的性能成为最有前景的下一代柔性导电薄膜的主体材料。如北京大学的闫文卿等人提出了先将碳纳米管(CNTs)在一定的分散体系中分散, 然后再组装形成薄膜, 这种方法可有效调控碳纳米管薄膜的导电性能和透光性能[8]。方敏等人通过研究发现, 可以将具有生物相容性的丝素蛋白与石墨烯材料进行一定的复合, 制备成生物基导电膜材料用于生物组织工程领域[9]。

目前绿色、环保已成为世界工业发展的主题。因此, 越来越多的科研工作者通过对导电材料的改革创新, 致力于开发绿色、环保型的复合导电膜材料[10]。如斯坦福大学崔屹教授团队[11]利用可生物降解的纳米纤维素作为透明导电薄膜基底, 将其与纳米导电材料复合成功制备了导电薄膜。马里兰大学胡良兵教授团队[12]以甘蔗渣中提取的纳米微晶纤维素为原料, 通过沉积法得到了可降解的纳米纤维纸, 并将其作为基底, 得到了掺杂锡的氧化铟、银纳米线的柔性透明导电薄膜。这些研究促进了导电薄膜的快速发展。

因此, 本课题以蚕丝脱胶废水中提取的天然蛋白质材料——丝胶蛋白为原料, 并和生物分子壳聚糖进行混合, 以纳米碳粉为导电材料, 赋予导电薄膜优良导电性的同时, 保留天然蛋白质的生物相容性, 分析探讨不同制备工艺下薄膜的厚度、导电性能、拉伸力学性能等, 并对最优工艺下的导电薄膜形貌和结构进行分析, 探讨其电学稳定性, 为绿色环保型的柔性导电薄膜的进一步发展提供相关理论依据。

## 2. 实验部分

### 2.1. 材料与试剂

丝胶蛋白(自制, 粒径约 50  $\mu\text{m}$ )、可溶性壳聚糖(河南俊一生物科技有限公司、食品级)、甘油(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)、纳米碳粉(20 nm, 苏州碳丰石墨烯科技有限公司)、去离子水(嘉兴学院自制)。

### 2.2. 设备与仪器

TD2102 型电子天平(余姚市金诺天平仪器有限公司)、HH-6 型数显恒温水浴锅(金坛市杰瑞尔电器有限公司)、DF-101S 型数显恒温磁力搅拌器(上海东玺仪器设备有限公司)、NDJ-5S 型数字式粘度计(上海衡平仪器仪表厂)、UA9233B 型数字万用表(杭州德力西集团)、线棒(上海乘乙仪器设备有限公司)、LCR 型数字电桥(深圳市日图科技有限公司)、FY101A-II 型电热鼓风烘箱(温州方圆仪器有限公司)、Apreo2C 型扫描电子显微镜(SEM)(赛默飞公司)、IS5/IS10XX 型傅立叶红外光谱仪(FTIR)(Thermo Nicolet 公司)。

### 2.3. 实验内容

#### 2.3.1. 碳粉分散液的制备

称取一定质量的纳米碳粉, 将纳米碳粉加入到 PVP 溶液中, 50 $^{\circ}\text{C}$  水浴中加热并保温 25 min, 搅拌至碳粉材料全部分散均匀, 得到不同质量分数(1%、2%、3%、4%、5%、6%、8%)的纳米碳粉分散液。

#### 2.3.2. 导电薄膜的制备

采用迈耶棒刮涂法[13][14], 通过控制变量法制备导电薄膜。具体步骤为: 先配置 50 mL 的丝胶蛋白与壳聚糖混合溶液作为基材, 在 60 $^{\circ}\text{C}$  下磁力搅拌 30 min (转速 950 r/min), 然后添加不同质量分数的纳米碳粉分散液, 最后滴加一定量的甘油(有效促进膜的成型, 改善碳粉聚集与团聚的现象, 使其分布更为均匀)[15], 保持匀速搅拌时间 1 h, 然后在柔性 PVC 板上刮涂出不同规格的薄膜, 放入烘箱烘干 1 h, 得到最终的导电薄膜。

制备过程中, 分别改变丝胶蛋白(SS)与壳聚糖(CS)的共混比(100:0、75:25、60:40、50:50、40:60、25:75、0:100)、导电碳粉的质量分数(1%、2%、3%、4%、5%、6%、8%)、烘干温度(20 $^{\circ}\text{C}$ 、40 $^{\circ}\text{C}$ 、60 $^{\circ}\text{C}$ 、80 $^{\circ}\text{C}$ 、100 $^{\circ}\text{C}$ ), 研究不同制备工艺对导电薄膜厚度、导电性能、拉伸力学性能的影响。

### 2.4. 导电薄膜的性能测试与表征

#### 2.4.1. 导电薄膜的表面形貌分析

将导电薄膜用导电胶固定在样品台上, 采用扫描电镜(SEM)分析, 加速电压 0.05~30 kV, 观察表面形貌。

#### 2.4.2. 导电薄膜的结构分析

采用傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)进行测试, KBr 压片法, 波数范围 500~4000  $\text{cm}^{-1}$  进行扫描。

#### 2.4.3. 导电薄膜的厚度分析

根据 GB/T 6672-2001 将制备好的共混膜放置在 YG141N 数字式织物厚度测量仪上, 距离膜的边 5 cm

处, 随机测取 5 不同的点, 取平均值。

#### 2.4.4. 导电薄膜的导电性能测定

将上述方法制备的导电薄膜, 取出剪裁成  $2\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  的长条, 在两端用导电胶分别粘上  $1\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$  的铜片, 采用数字电桥测量导电膜的表面电阻( $\Omega$ ), 测试示意图如图 1。

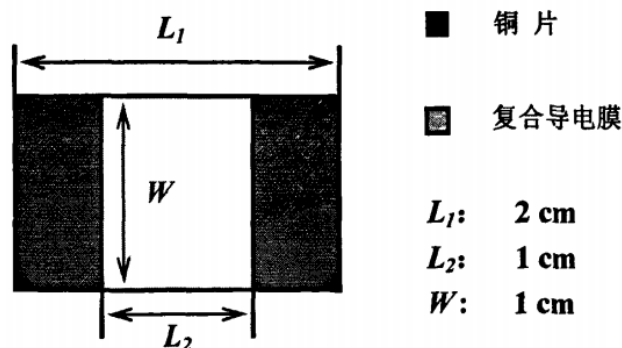


Figure 1. Schematic diagram of conductivity test  
图 1. 导电性的测试示意图

#### 2.4.5. 导电膜的力学性能测定

将上述方法制备的导电膜脱模, 剪裁成  $10\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  的长条, 在织物拉伸强力仪上测定其拉伸性能。

#### 2.4.6. 导电膜的柔软性测定

将上述方法制备的导电膜材料, 剪裁成  $25\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$  的长条, 在织物刚性测试仪上测定其柔软性。

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 丝胶蛋白/壳聚糖共混比对导电薄膜性能的影响

采用控制变量法, 保持纳米碳粉的含量为 5%, 烘干温度为  $60^\circ\text{C}$ , 分别改变丝胶蛋白与壳聚糖的共混比, 得到不同的膜材料, 对其成膜性、膜的厚度测定结果见表 1 所示。

Table 1. The thickness of conductive films with different blending ratios  
表 1. 不同共混比的导电膜厚度

丝胶蛋白与壳聚糖质量比	成膜性	厚度/mm						平均值
100:0	成膜性较一般	0.28	0.27	0.27	0.29	0.31		0.284
75:25	成膜性良好	0.29	0.30	0.28	0.29	0.31		0.294
60:40	成膜性能优异	0.31	0.3	0.27	0.28	0.29		0.29
50:50	成膜性能优异	0.32	0.29	0.31	0.31	0.29		0.304
40:60	成膜性能良好	0.31	0.30	0.31	0.32	0.32		0.312
25:75	成膜性能较差	无法形成连续均一的膜						
0:100	成膜性差	几乎无法成膜						

在制备复合导电膜的过程中, 发现随着丝胶蛋白的质量减少, 壳聚糖质量的增加, 溶液的黏度逐渐增大, 导致最后很难成膜, 因此, 7 种不同的共混比, 只有 5 种共混比下能够形成较为完整均一的复合

膜。从表 1 中可知,这 5 种膜的厚度差异不大,基本上在 0.28~0.31 mm 之间,因此对于测定其他性能具有一定的可比性。

对制备得到的 5 种导电膜,测定导电膜上不同位置的表面电阻值,取平均值,结果见图 2 所示。

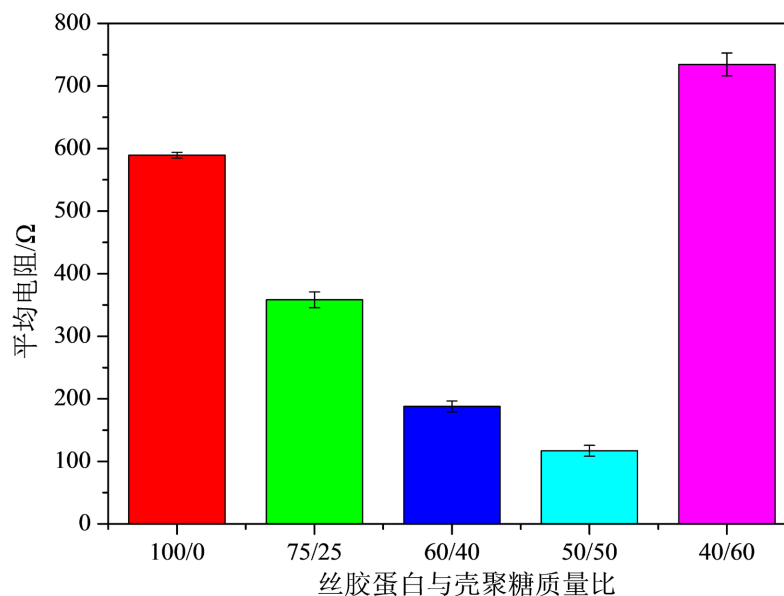


Figure 2. Conductivity of conductive films with different blending ratios

图 2. 不同共混比导电膜的导电性能

从图中可知,随着丝胶蛋白含量的降低,制备的导电膜,其电阻呈现先减小后增大的趋势。说明丝胶蛋白在逐渐增加的过程中,成膜性能从一般良好逐渐提升至优异。这可能是因为丝胶蛋白具有良好的成膜性质,它能够在导电膜表面形成均匀、连续的膜层,有助于提高导电性能。此外,丝胶蛋白的添加有助于提高导电膜中纳米碳粉的分散性和连续性,在成膜体系之间构建形成均匀、稳定的电子传输网络,使得膜的电阻逐渐减小。然而,随着丝胶蛋白含量的降低,体系中壳聚糖含量在逐渐增加,成膜性能从优异逐渐下降至差。壳聚糖的添加导致膜层的不均匀性,进而影响导电膜中纳米碳粉的分散性,使其不再具有良好的连续性。这些因素综合起来,可能会导致导电性能的下降和电阻的增加。导电性最好的膜材料,到其电阻仅为 117 Ω,远远小于  $10^5$  Ω,超过了导电性的要求,此时丝胶蛋白与壳聚糖的质量比为 50:50。

对比不同质量混合比下导电膜的拉伸力学性能,结果见表 2 所示。

Table 2. Tensile mechanical properties of conductive films with different blending ratios

表 2. 不同共混比导电膜的拉伸力学性能

丝胶蛋白与壳聚糖共混比	断裂强力/CN	断裂伸长率/%	断裂时间/s
100:0	299.6	2.97	1.4
75:25	391.8	3.68	1.2
60:40	606.8	3.96	1.6
50:50	546.1	4.12	1.5
40:60	203	5.52	1.0

从表 2 可知, 制备的导电膜在样品同等大小下, 其强力差异较大, 强力最大的是丝胶蛋白/壳聚糖共混比为 60:40, 其次是 50:50, 但是这 2 种状态下膜的强力差异不是特别大。考虑到导电性为关键指标, 因此, 在后续制备时, 两种材料的质量共混比为 50:50。

### 3.2. 纳米碳粉含量对导电薄膜性能的影响

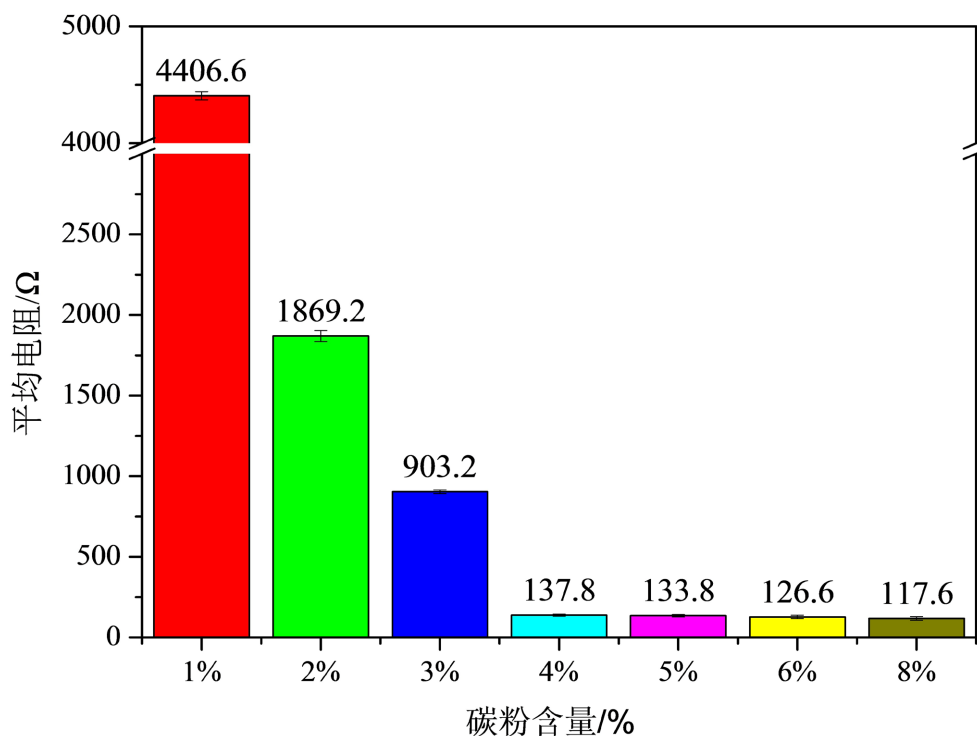
保持其他条件不变, 改变碳粉含量, 制备的各种导电膜, 其厚度如表 3 所示。

**Table 3.** The thickness of conductive films with different carbon powder content

**表 3.** 不同碳粉含量下导电膜的厚度

碳粉质量分数	厚度/mm					平均值
1%	0.27	0.26	0.25	0.27	0.25	0.260
2%	0.27	0.25	0.26	0.27	0.28	0.266
3%	0.26	0.26	0.27	0.27	0.26	0.264
4%	0.25	0.27	0.27	0.28	0.27	0.268
5%	0.28	0.27	0.28	0.27	0.28	0.276
6%	0.28	0.28	0.27	0.28	0.29	0.280
8%	0.28	0.29	0.27	0.28	0.29	0.282

从表 3 中可以明显看出, 随着碳粉含量的增加, 导电膜的厚度变化不大, 略微有一定程度的增加。



**Figure 3.** Conductivity of conductive films with different carbon powder content

**图 3.** 不同导电碳粉含量下导电膜的导电性能

不同碳粉含量的导电膜，其导电性能如图 3 所示。从图中可以看出，随着导电碳粉含量的增加，导电膜的导电性能呈指数型降低，即随着碳粉含量的增加，导电膜的电阻值呈现逐渐减小的趋势。然而，当导电碳粉含量达到 4% 时，导电膜的电阻值变化较为平稳，并保持在  $100\ \Omega$  左右。这说明在碳粉含量为 4%~8% 范围内，导电膜的导电性能达到了一个相对稳定的状态，见图 3。

表 4 为不同碳粉含量下，导电膜的拉伸力学性能。

**Table 4.** Tensile mechanical properties of different conductive films

**表 4.** 不同导电膜的拉伸力学性能

碳粉质量分数	断裂强力/CN	断裂伸长率/%	断裂时间/s
1%	655.7	1.7	1.6
2%	695.7	1.7	1.5
4%	745.6	1.6	1.5
5%	785.7	1.6	1.5
6%	779.7	1.5	1.5
8%	730.8	1.4	1.5

从表 4 的结果可以看出，随着碳粉含量的增加，制备的导电膜的断裂强力和断裂伸长率呈现先增加后下降的趋势，断裂时间基本不变。当碳粉含量为 5% 时，导电膜的断裂强力最大，为 785.7 cN。结合导电性数据，因此后续实验选择碳粉含量为 5%。

### 3.3. 烘干温度对导电薄膜性能的影响

在膜的制备过程中，其他条件相同时，烘干时间为 1 h，改变烘干过程的温度，对得到的不同导电膜厚度进行测定分析，其结果如下表 5 所示。

**Table 5.** The thickness of conductive films with different conductive power content

**表 5.** 不同导电碳粉含量下导电膜的厚度

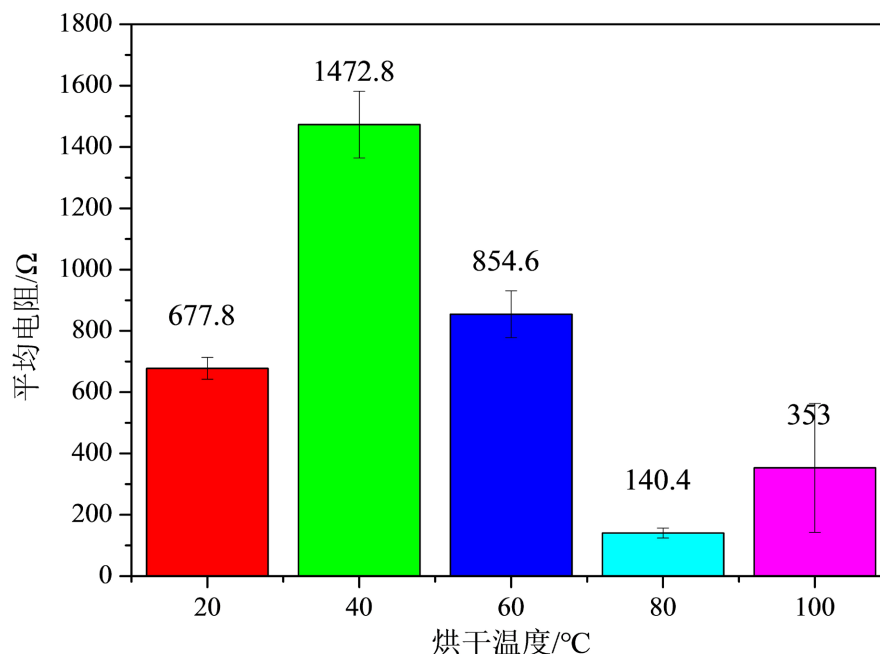
烘干温度/ $^{\circ}\text{C}$	厚度/mm					平均值
20	0.25	0.25	0.26	0.25	0.25	0.252
40	0.26	0.26	0.26	0.27	0.25	0.26
60	0.26	0.26	0.26	0.27	0.26	0.262
80	0.26	0.26	0.27	0.27	0.25	0.262
100	0.26	0.27	0.27	0.26	0.27	0.266

从表 5 可知，烘干温度对导电膜的厚度无明显影响，厚度均在 0.25~0.26 mm 左右，但是烘干温度越高，膜的厚度略微有所增大。

不同烘干温度下，导电膜的导电性能和拉伸力学性能如图 4 和表 6 所示。

从图 4 可知，随着烘干温度的变化，其电阻也出现较为明显的波动，当烘干温度为  $80\ ^{\circ}\text{C}$  时，制备的导电膜电阻值最小，为  $140.4\ \Omega$ ，其导电性能最好。从表 6 中可知，随着烘干温度的增大，导电膜的断裂强力、断裂伸长率均呈现先增大后减少的趋势。这可能是由于烘干温度太低，导电膜中的溶剂挥发速度

较慢,可能导致膜层干燥不充分,结构松散,影响导电膜的电性能。烘干温度太高,容易导致导电膜内部产生裂纹、烧结等现象,降低导电膜的机械强度,使导电性能误差变大[16]。在烘干温度为 80℃时,有利于导电膜复合体系中的溶剂快速挥发,使导电膜干燥充分,同时也可以保持导电膜的机械强度和导电性能。



**Figure 4.** Conductivity of conductive films with different conductive toner content  
**图 4.** 不同导电碳粉含量下导电膜的导电性能

**Table 6.** Tensile mechanical properties of different conductive films  
**表 6.** 不同导电膜的拉伸力学性能

烘干温度/°C	断裂强力/CN	断裂伸长率/%	断裂时间/s
20	619.4	1.1	1.2
40	645.3	1.5	1.4
60	901.4	2.1	2.2
80	765.7	1.6	1.5
100	211.4	0.7	0.8

综上,导电膜的最佳制备工艺条件为:丝胶蛋白与壳聚糖质量比 50:50,碳粉含量为 5%,烘干温度 80℃。

### 3.4. 最佳工艺下导电膜的结构与性能

#### 3.4.1. 最佳工艺下导电膜的柔软性测定

为了测定导电膜的柔软性,将最佳工艺下制备好的膜材料,在织物刚柔性测试仪上进行多次测定,并取平均值,结果如表 7 所示。



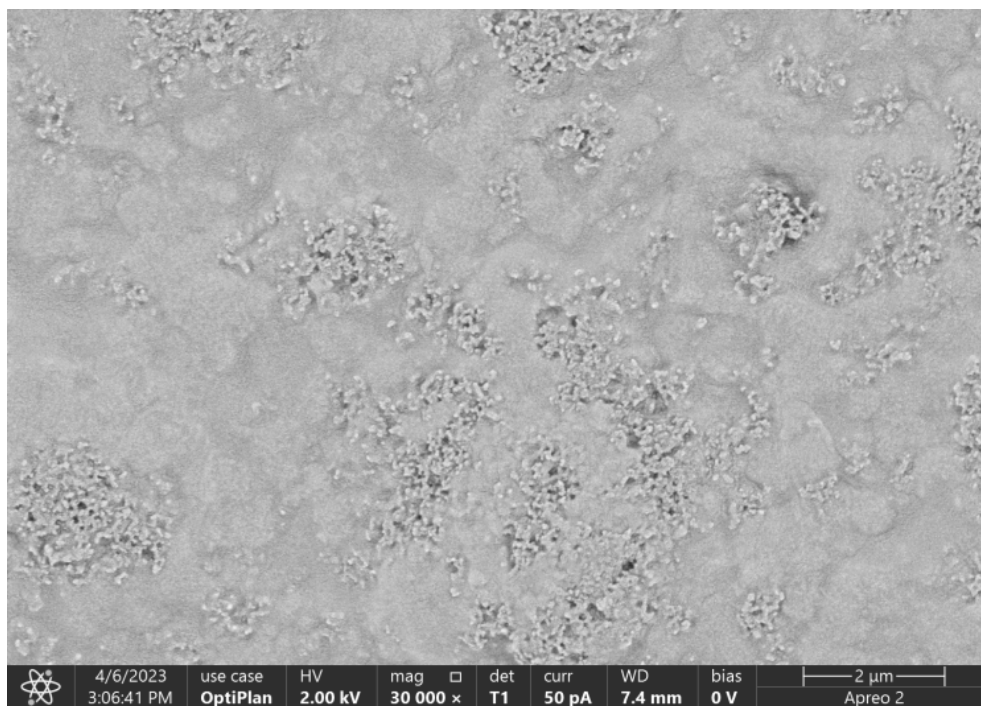
**Table 7.** The softness of conductive films under optimal process**表 7.** 最佳工艺下的导电膜柔软性测试结果

样品	伸出长度/mm	弯曲长度/mm	抗弯刚度/mg·cm
样品 1	24.6	12.3	489.4
样品 2	25.1	12.5	513.6
样品 3	26.6	13.3	618.7
样品 4	24.8	12.4	501.44
样品 5	25.4	12.7	538.7
平均值	25.3	12.64	532.368

从表可以看出, 最佳工艺下的导电膜材料, 其抗弯刚度数值较小, 表明导电膜材料刚性较小, 容易发生弯曲变形。其平均值为 532 mg·cm, 与常见的棉织物抗弯刚度较为接近[17], 说明所制备的导电膜具有一定的柔软性, 可以进行弯曲。

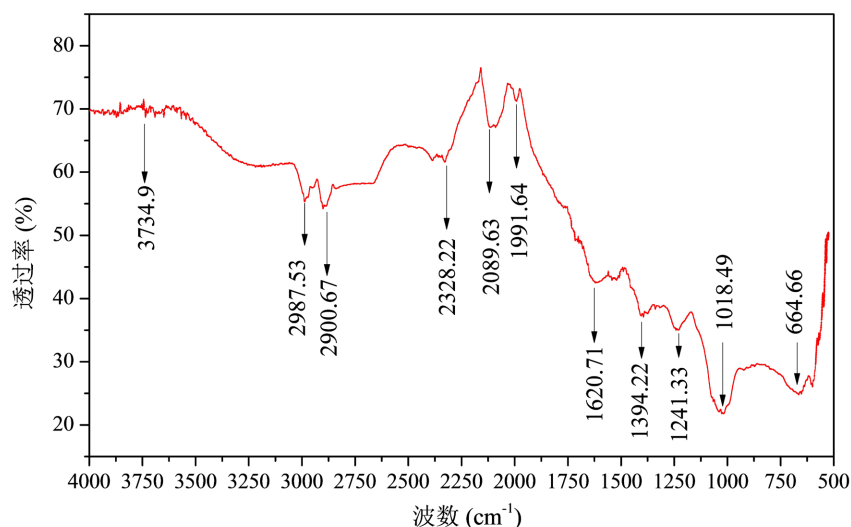
### 3.4.2. 最佳工艺下导电膜的形貌结构

将最佳工艺下制备导电膜, 采用扫描电子显微镜对其外观形貌进行分析, 其结果见图 5 所示。从图中可以看出, 所制备的膜表面相对比较平整, 呈现较为均一的表面结构, 说明纳米碳粉在壳聚糖与丝胶蛋白的基体中分散较为均匀, 然而在个别区域出现了纳米碳粉的聚集现象, 但并不影响导电膜的导电性质。

**Figure 5.** SEM picture of conductive film**图 5.** 导电膜的 SEM 图

### 3.4.3. 最佳工艺下导电薄膜的结构分析

将最佳工艺下的柔性导电膜进行红外光谱分析, 其结果如图 6 所示。

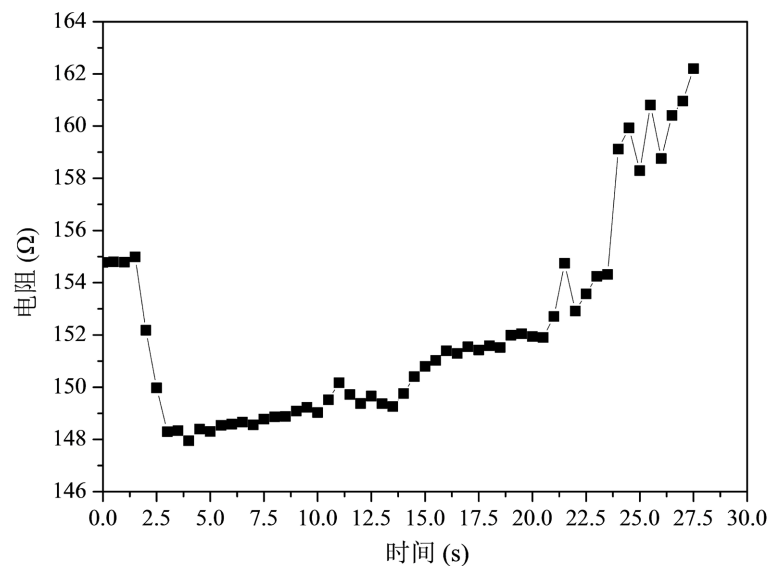


**Figure 6.** Infrared spectrum of conductive film  
**图 6.** 导电膜的红外光谱图

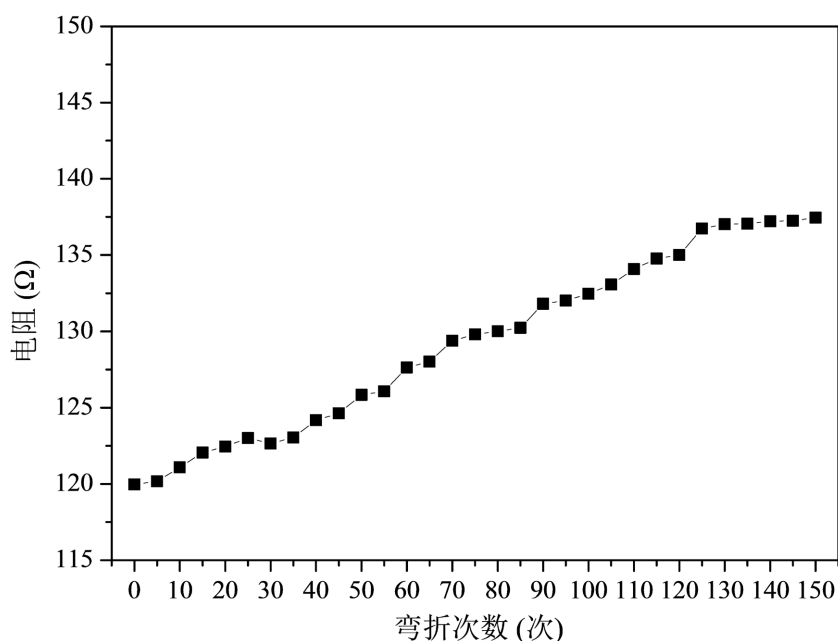
从图中可以看出,对柔性导电膜的结构进行红外光谱分析,其结果见图 6 所示。从图中可知,  $3734.9\text{ cm}^{-1}$  附近为-OH (羟基)的伸缩振动峰,说明膜材料中存在亲水性基团;在  $2987.53$  和  $2900.67\text{ cm}^{-1}$  处为 C-H 的伸缩振动,也有可能是壳聚糖分子末端的醛基的 C-H 振动峰;在  $2328.22$  和  $2089.63$  处的强峰为蛋白质分子中 C-N 的特征峰;在  $1991.64\text{ cm}^{-1}$  为蛋白分子上的 C=O 的伸缩振动峰;在  $1620\text{ cm}^{-1}$  处为 C=C 的伸缩振动峰,在  $1300\sim 800\text{ cm}^{-1}$  这个范围内的峰为 C-C 单键的骨架振动峰。因此,说明所制备的复合导电膜中,有丝胶蛋白和壳聚糖两种基体,也有导电碳粉的存在。

#### 3.4.4. 最佳工艺下导电薄膜的电学稳定性分析

导电膜的电学稳定性对于其后续使用具有重要的意义,因此分别在不同拉伸时间和弯折次数下测试导电膜的拉伸电学性能和弯折电学性能,其结果见图 7 和图 8 所示。



**Figure 7.** Resistance change curve of conductive film at different stretching times  
**图 7.** 不同拉伸时间下导电膜的电阻变化曲线



**Figure 8.** Resistance change curve of conductive film at different bending times  
**图 8.** 不同弯折次数下导电膜的电阻变化曲线

从图 7 可知, 导电薄膜具有较高的灵敏性。当开始拉伸时, 导电膜的电阻, 在短时间内迅速下降, 随着拉伸时间的延长, 电阻后续又逐渐增大, 但最大值不超过 165  $\Omega$ 。这可能是由于在刚开始拉伸时, 导电材料内部结构趋于致密化, 导电碳粉之间形成了互联体, 增加了其电子转移, 引起电阻值的下降。在后续拉伸时间较长时, 原来的柔性膜材料长度发生了伸长, 电阻与导体的长度成正比关系, 所以其电阻也会随之变大。

从图 8 看出, 随着弯折次数的增加, 柔性导电膜的电阻值逐渐变大, 但是变化幅度较小, 当弯折次数到达 150 次时, 电阻仅从开始的 119.96  $\Omega$  增加到 137.45  $\Omega$ 。这种微小的变化可以解释为导电膜内部微观结构的变化, 包括导电颗粒的重新排列和界面的断裂。

#### 4. 结语

(1) 以丝胶蛋白和壳聚糖为原料, 纳米碳粉为导电粉体, 采用迈耶棒刮涂法, 可以制备出具有优异导电性和一定力学性能的导电膜材料。

(2) 通过控制变量法, 得到最优的导电膜制备工艺为: 丝胶蛋白与壳聚糖质量比 50:50, 碳粉含量为 5%, 烘干温度 80 $^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 最佳工艺下, 导电膜的抗弯刚度小, 柔性较好, 表面平滑, 导电膜内部微观结构分布均匀, 使其能够抵抗外界应力和变形。

(4) 在拉伸和多次弯折过程中, 导电膜的电阻有一定的变化, 但总体上变化不明显, 说明所制备的柔性导电膜具有一定的电学稳定性, 对于后期在柔性传感器和智能可穿戴领域的应用具有重要意义。

#### 基金项目

嘉兴市公益性研究计划项目(2022AY10014); 2022 年嘉兴南湖学院国家级大学生创新创业训练计划项目(202213291006); 嘉兴南湖学院 2022 年 SRT 项目(8517223126)。

## 参考文献

- [1] 刘湘梅, 龙庆, 赵强, 刘淑娟, 黄维. 石墨烯透明导电薄膜的研究进展[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2013, 33(4): 90-99.
- [2] 苗锦雷. 石墨烯基透明导电薄膜的制备及其性能研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津工业大学, 2018.
- [3] 张兴祥, 耿宏章. 碳纳米管、石墨烯纤维及薄膜[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [4] 蒲勇, 阮海波, 刘碧桃. 纳米银线柔性透明导电薄膜的制备与研究进展[J]. 电子元件与材料, 2016, 35(11): 54-60.
- [5] 何维凤, 赵玉涛, 李素敏, 等. 柔性透明导电薄膜的制备及其发展前景[J]. 材料导报, 2005, 19(3): 32-36.
- [6] Jo, J.W., Jung, J.W., Lee, J.U., *et al.* (2010) Fabrication of Highly Conductive and Transparent Thin Films from Single-Walled Carbon Nanotubes Using a New Non-Ionic Surfactant via Spin Coating. *ACS Nano*, **4**, 5382-5388. <https://doi.org/10.1021/nn1009837>
- [7] 黄兵, 刘萍. 金属网格柔性透明导电薄膜研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(5): 140-151.
- [8] 闫文卿, 张则尧, 李彦. 碳纳米管透明导电薄膜的可控制备[J]. 高等学校化学学报, 2022, 43(3): 1-11.
- [9] 方敏, 王璐, 侯佳欣, 等. 丝素蛋白复合石墨烯类材料在生物医学领域中的研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(z1): 511-515.
- [10] 梁岩冰, 李林昊, 王丽珍, 徐鹏, 高元明, 樊瑜波. 石墨烯/蚕丝蛋白复合膜的构建、表征与生物相容性评估[J]. 功能材料, 2017, 48(7): 7001-7005.
- [11] Hu, L., Zheng, G., Yao, J., *et al.* (2013) Transparent and Conductive Paper from Nanocellulose Fibers. *Energy & Environmental Science*, **6**, 513-518. <https://doi.org/10.1039/C2EE23635D>
- [12] Tao, J., Fang, Z., Zhang, Q., *et al.* (2017) Super-Clear Nanopaper from Agro-Industrial Waste for Green Electronics. *Advanced Electronic Materials*, **3**, Article ID: 1600539. <https://doi.org/10.1002/aelm.201600539>
- [13] 李垚垚. 柔性导电材料的制备与应用研究[D]: [硕士学位论文]. 深圳: 深圳大学, 2018.
- [14] 李秀强, 张东. 化学法制备石墨烯基透明导电薄膜的研究进展[J]. 功能材料, 2014, 45(S1): 12-19, 24.
- [15] 杨维, 李季衡, 李国英. 甘油对胶原溶液粘弹性和热稳定性的影响[J]. 中国皮革, 2009, 38(3): 15-18+32.
- [16] 葛姝含, 李新华, 顾心怡, 郝凌云, 王威, 张伟. 银纳米线柔性透明导电薄膜的制备及研究进展[J]. 广东化工, 2022, 49(15): 75-77.
- [17] 陆冰, 秦步祥. 竹纤维与棉纤维的织物性能分析[J]. 中国纤检, 2009(1): 75-76.