

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.04.016

袁虎, 陈复生. 花青素—淀粉智能指示膜的制备及性能研究[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(4): 129-135.

YUAN H, CHEN F S. Preparation and properties of anthocyanin-starch intelligent indicator film[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(4): 129-135.

# 花青素—淀粉智能指示膜的制备及性能研究

袁 虎, 陈复生✉

(1. 河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001;  
2. 中原食品实验室, 河南 漯河 462300)

**摘要:** 以淀粉为原料, 花青素为功能性物质, 采用静电纺丝法制备了淀粉纳米纤维智能指示膜, 并研究其结构和性能。结果表明: 花青素负载量的增加会增大纤维直径和指示膜的水接触角。指示膜的晶态决定其力学性能, 花青素添加到 10% 以上时指示膜结晶度较高其断裂应力也随之升高, 达到了 12.0 MPa, 但断裂伸长率减小到了 5.8%。加入花青素的指示膜热稳定性有所提升。静电纺丝过程不会改变淀粉和花青素的分子结构, 指示膜的指示功能主要是通过花青素中酚羟基的电离状态改变引起颜色变化实现, 抗氧化功能是酚羟基提供的还原性赋予的。这些结果证明了淀粉花青素智能指示膜具有良好的指示性, 可用于监测食品品质变化。

**关键词:** 淀粉; 花青素; 静电纺丝法; 纳米纤维; 智能指示膜

中图分类号: TS206.4 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)04-0129-07

网络首发时间: 2024-05-13 08:50:59

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.ts.20240511.1108.003>

## Preparation and Properties of Anthocyanin-starch Intelligent Indicator Film

YUAN Hu, CHEN Fu-sheng✉

(1. College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China; 2. Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe, Henan 462300, China)

**Abstract:** Starch was used as raw material and anthocyanins were used as functional substances. Intelligent indicator films of starch nanofibers were prepared by electrospinning method, and their structure and properties were studied. The results showed that the fiber diameter and the water contact Angle of the indicator films increased with the increase of anthocyanin loading. The crystal state of the indicated film determined its mechanical properties. When the anthocyanin was added to more than 10%, the fracture stress of the indicated film was higher, reaching 12.0MPa, but the elongation at break reduced to 5.8%. When anthocyanins were added, the thermal stability of the indicator film was improved. The molecular structure of

收稿日期: 2024-04-09

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFD2101403)

Supported by: National Key Research and Development Project of China (No. 2022YFD2101403)

作者简介: 袁虎, 男, 1998 年出生, 在读硕士生, 研究方向为食品资源开发与利用。E-mail: 2623752559@qq.com

通信作者: 陈复生, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 研究方向为食品资源开发与利用。E-mail: fushengc@haut.edu.cn

starch and anthocyanin did not changed in the process of electrospinning. The indicator function of the indicator film was mainly realized through the color change caused by the change of ionizing state of phenolic hydroxyl group in anthocyanin. The antioxidant function was due to the reducibility provided by phenolic hydroxyl group. These results proved that the intelligent indicator film of amyloanthocyanin had the good indicator property and could be used to monitor food quality change.

**Key words:** starch; anthocyanins; electrospinning; nanofiber; intelligent indicating film

智能指示包装是一种集成了传感器技术、新材料科学和食品科学的新型包装形式，是未来食品包装的发展方向之一<sup>[1]</sup>。静电纺丝技术被广泛用于纳米纤维的制备，通过调整溶剂、质量分数和工艺参数可以精准控制纤维形态和结构。纳米纤维膜因其独特的微观结构和优异的性能，在智能食品包装领域展现出了巨大的应用潜力和优势<sup>[2]</sup>。含有智能传感器的纳米纤维膜，能够监测并实时反馈食品内部的温度、湿度、氧气含量等参数，帮助消费者判断食品的新鲜度和安全状况<sup>[3]</sup>。目前，智能包装的研究主要集中在利用生物活性成分和多糖类聚合物制备指示膜，以实现食品新鲜度的实时监测<sup>[4]</sup>。

目前，智能指示膜的制备方法集中于溶液流延法，原料大多是合成聚合物。本研究以天然聚合物——淀粉作为原料，通过静电纺丝法制备了环境友好的淀粉花青素纳米纤维智能指示膜，并研究其性能，为静电纺纳米纤维膜用作智能指示膜提供了一定的依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 原料与试剂

玉米淀粉，食品级二级品：河南麦优田贸易有限公司；蓝莓花青素，纯度 5%~25%：上海麦克林生化试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

TESCAN MIRA LMS 扫描电子显微镜：捷克 Tescan；SmartLab SE X 射线衍射仪：日本 Rigaku 公司；TA Q50 热重分析仪：美国 TA 公司；Nicolet FT-IR 傅里叶红外变换光谱仪：赛默飞世尔科技公司；CR-400 色彩照度计：日本 Konica Minolta 公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 纺丝溶液的配 置

按溶液质量分数为 22% (w/v) 称取适量玉米淀粉，加入二甲基亚砷中，50 °C 水浴搅拌 2 h，再分别称取 5%、10%、15% 干基质量的花青素加入其中，室温下搅拌至均匀。

#### 1.3.2 淀粉花青素智能指示膜的制备

调节静电纺丝设备的环境温度至 50 °C，湿度 40%~50%。将纺丝溶液转移到注射器中安装到注射泵上，安装纺丝针头并连接高压电源。调整针头与接收器间距为 15 cm，纺丝电压 18 kV，纺丝速度 0.4 mL/h。将制得的指示膜置于 50 °C 烘箱中干燥 24 h 备用。

#### 1.3.3 指示膜形貌的表征

裁剪下平整的智能指示膜，喷金后置于扫描电子显微镜的样品室内，抽真空后观察纤维形貌，使用 Image Pro Plus 6.0 随机测量每张指示膜中 100 根纤维的直径进行统计分析。

#### 1.3.4 指示膜润湿性测试

将指示膜置于样品台上，控制微量注射器挤出 3  $\mu$ L 蒸馏水，拍摄指示膜与水接触 3 s 后的图像，利用公式拟合水滴轮廓，计算指示膜与水的接触角。

#### 1.3.5 指示膜力学性能测试

参照国家标准 GB/T 1040.3—2006《塑料 拉伸性能的测定第 3 部分：薄膜和薄片的试验条件》的基础上加以修改，将纳米纤维膜裁剪成 10×50 mm 的条形，设定夹具初始间隙为 30 mm，拉伸速度为 1 mm/s。

#### 1.3.6 指示膜的晶态测定

利用 X 射线衍射仪检测指示膜的晶态，测试条件为：Cu-K $\alpha$  射线 ( $\lambda=1.540 56 \text{ \AA}$ )，管电流 15 mA，管电压：40 kV，扫描速度：12 °/min，扫描角度

范围： $5^{\circ}\sim 90^{\circ}$

### 1.3.7 指示膜的热稳定性分析

利用热重分析仪检测指示膜的热稳定性。称取 10 mg 样品,加入样品槽中,设定氮气流量 60 mL/min,测试温度范围 50~600  $^{\circ}\text{C}$ ,升温速率 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

### 1.3.8 指示膜的分子结构测定

使用傅里叶变换红外光谱测定指示膜的分子结构。设置光谱分辨率为 4  $\text{cm}^{-1}$ ,波长范围为 400~4 000  $\text{cm}^{-1}$ 扫描 32 次得到样品的傅里叶变换红外光谱图。

### 1.3.9 指示膜 pH 指示性的测定

配置 pH 分别为 2、4、6、7、8、10、12 的标准缓冲液,室温保存。将指示膜固定于培养皿底部,倒入标准缓冲液浸泡,2 h 后使用色彩照度计测定膜的  $L$ 、 $a$ 、 $b$  值,计算  $\Delta E$ 。

### 1.3.10 指示膜挥发性盐基氮指示性的测定

配置 8 mmol/L 的氨水,室温保存。向培养皿中倒入 10 mL 8 mmol/L 的氨水,将指示膜固定在上盖的内部并盖上,在不同时间段内用色彩照度计测量膜的  $L$ 、 $a$ 、 $b$  值,计算  $\Delta E$ 。

### 1.3.11 指示膜抗氧化性的测定

将指示膜置于 10 mL 水中避光浸泡 2 h,分别取 2 mL 和 1 mL 浸泡液与 2 mL 1,1-二苯基-2,2-三硝基苯肼 (DPPH) 溶液 (0.1 mM) 和 3 mL 2,2-联氮-二 (3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸) 二铵盐 (ABTS) 工作液混合,分别避光反应 30 min 和

10 min 后,分别于 517 nm 和 734 nm 处测定吸光值。计算指示膜的 DPPH 和 ABTS 自由基清除率。

## 1.4 数据处理

每组实验取 3 次结果的平均值,采用 SPSS 25 软件进行显著性分析, $P<0.05$  认为具有显著性差异,使用 Origin 2021 进行绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 淀粉共混花青素纳米纤维形貌变化规律研究

花青素负载量对淀粉纳米纤维形貌的影响规律如图 1 所示,当花青素负载量为 5% 时,单根纤维粗细不均,纤维中有明显的梭形结构出现。随着负载量的增加,单根纤维直径愈发均匀,且逐渐增大,纳米纤维平均直径从 (194 $\pm$ 35) nm 增加到了 (252 $\pm$ 39) nm。

静电纺丝法主要是利用高分子溶液中分子链之间的缠结制备纳米纤维<sup>[5]</sup>,花青素是小分子物质<sup>[6]</sup>,加入溶液之后使得溶液质量分数增加。但是其对淀粉分子链缠结没有促进作用。溶液中淀粉质量分数不变的情况下,花青素分子会占据空间,阻碍淀粉分子链的缠结,导致纺丝时,分子链缠结程度不够,不能很好的维持纤维状,出现粗细不均的纳米纤维。同时,溶液总质量分数增加,花青素分子会被淀粉分子链包裹形成纳米纤维,导致纤维直径随负载量而增加。综上所述,从纤维形貌角度考虑,负载 10% 花青素的淀粉纳

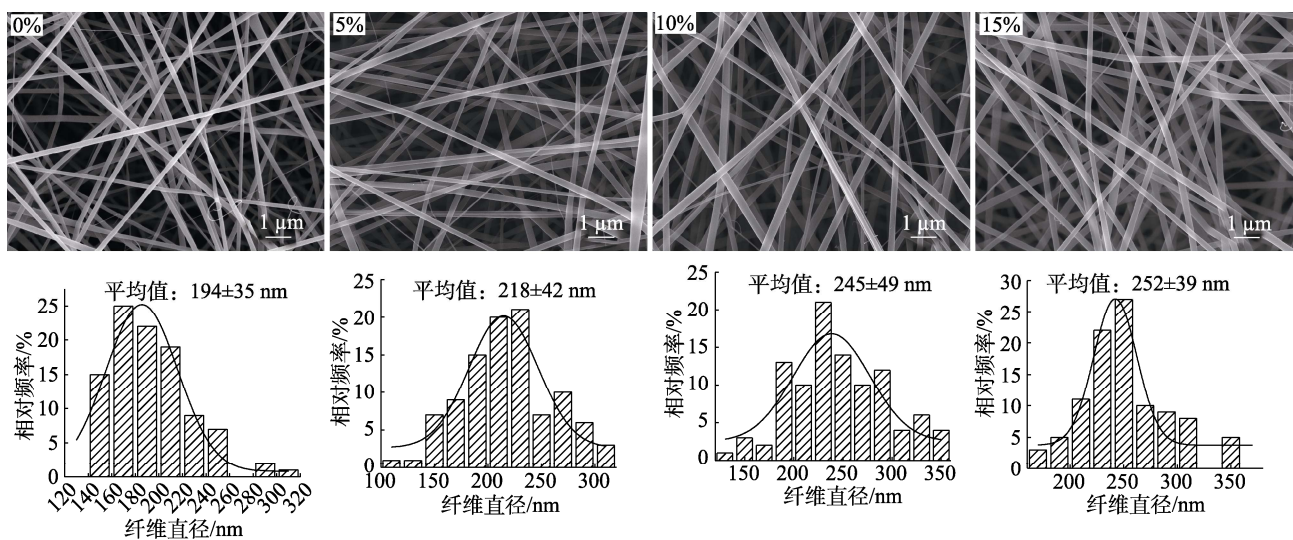


图 1 淀粉共混花青素纳米纤维的形貌变化规律

Fig.1 Morphological changes of starch blended anthocyanin nanofibers

米纤维膜形貌较好,且纤维直径较小,适合用于后续实验。

## 2.2 智能指示膜的润湿性变化规律研究

测定了指示膜的水接触角如图 2 所示。指示膜的水接触角随着花青素负载量的增加而增大,由未负载花青素时的  $22.8^\circ$  逐渐增加到负载 15% 花青素时的  $44.1^\circ$ ,但始终远小于  $90^\circ$ ,具有较强的亲水性和润湿性。花青素是一种天然色素大多

以糖苷形式存在<sup>[7]</sup>。相较于淀粉而言,蓝莓花青素的分子结构中亲水基团含量较少,因此其亲水性小于淀粉<sup>[8]</sup>。蓝莓花青素与淀粉共混纺丝之后,均匀分布在淀粉纳米纤维的表面和内部。淀粉纳米纤维膜的表面由于蓝莓花青素的加入亲水性下降,因此水接触角增大。随着花青素负载量的增加,淀粉纳米纤维膜表面的蓝莓花青素也越来越多,亲水性逐渐降低,接触角慢慢增大<sup>[9]</sup>。

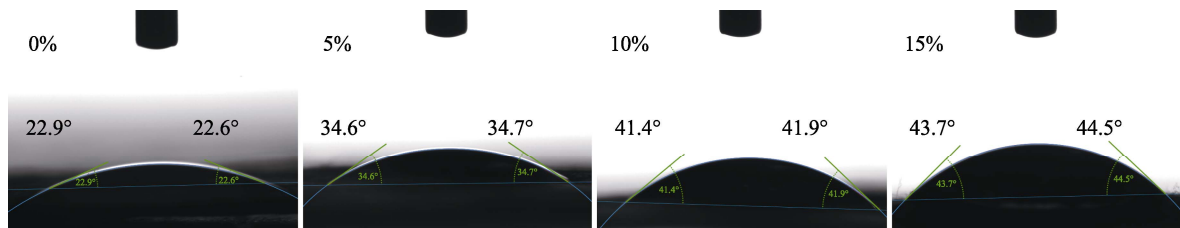


图 2 花青素对淀粉纳米纤维膜润湿性的影响

Fig.2 Effect of anthocyanins on wettability of starch nanofiber film

## 2.3 智能指示膜力学性能变化规律研究

研究了指示膜的拉伸性能如图 3 所示。花青素的添加造成了指示膜断裂伸长率的显著降低,当花青素添加到 10% 时,指示膜的断裂伸长率为 5.8%,随后断裂伸长率不再降低。指示膜的断裂应力随着花青素添加量的增加呈现出先降低后升高的趋势,添加 5% 的花青素会使指示膜的断裂应力从 11.0 MPa 降低到 5.9 MPa,添加 10% 以上的花青素则会升高到 12.0 MPa。屈服应变和屈服应力也表现出相同的趋势。

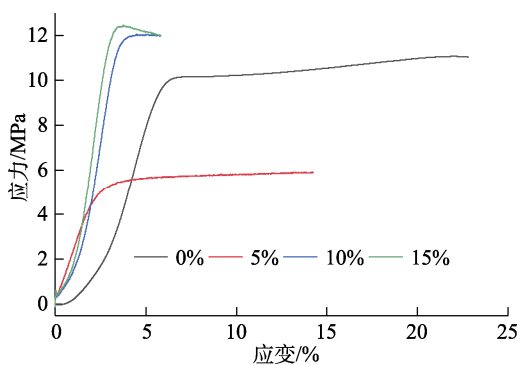


图 3 淀粉花青素智能指示膜的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve of starch anthocyanin intelligent indicator film

淀粉分子链较短,花青素加入后会被淀粉分子链包裹在其中阻碍链段运动,导致指示膜在拉伸时淀粉分子链不能充分伸展,指示膜的断裂伸

长率下降。花青素添加量较少时对于淀粉分子链的阻碍有限,淀粉分子链仍有一定的伸展空间,受到拉伸时能进行一定的链段运动。当负载量达到 10% 以后,花青素小分子充斥在淀粉分子链之间完全阻碍了淀粉分子链的链段运动,因此在受到拉伸时淀粉分子链几乎不能运动,指示膜难以拉伸,断裂伸长率降到最低<sup>[10]</sup>。因此,指示膜中的花青素负载量在 10% 以上时,智能指示膜的断裂应力较高,但断裂伸长率较小。

## 2.4 智能指示膜的晶态分析

对指示膜进行了 X 射线衍射分析,结果如图 4 所示。花青素在  $20^\circ$  处有较强的弥散峰与淀粉类似,呈现出半结晶态的特征,弥散峰强度较高说明样品中有较多的结晶区。将粉末制备成指示膜之后光谱连续,无明显衍射峰出现,说明样品结晶度较低。淀粉在二甲基亚砷溶液中展开<sup>[11]</sup>,结晶区被破坏,同时花青素也均匀分散在溶液中被链状淀粉分子包裹。纺丝时淀粉分子链缠结维持纤维状结构,并将花青素分子包裹在其中,淀粉和花青素分子在电场力的作用下不能自发形成长程有序结构,以非晶态形式存在。同时,花青素分子均匀、无序的分布在淀粉分子链形成的网状结构中,进一步降低了纳米纤维膜有序性,使得纳米纤维膜的 X 射线衍射性更弱,所得光谱无衍射峰存在。

此外,负载 5%花青素的指示膜的衍射峰强度最低,其它 3 个负载量的指示膜的衍射峰强度几乎相同,说明负载 5%花青素指示膜的结晶度最低,其他 3 个几乎相同。非晶态聚合物的力学性能与其结晶度有很大关系<sup>[12]</sup>。结合指示膜的力学性能分析结果可知,指示膜的力学性能与其结晶度有较大关系,结晶度越大则断裂应力越高。

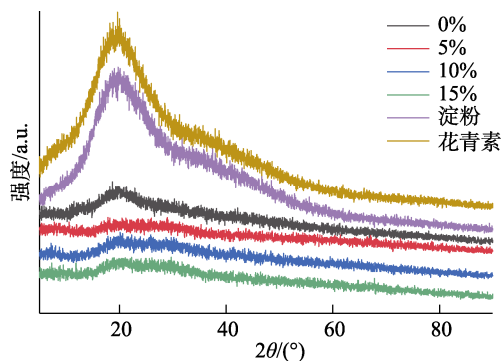


图 4 淀粉花青素智能指示膜的 X 射线衍射光谱  
 Fig.4 X-ray diffraction spectra of starch anthocyanin intelligent indicator films

## 2.5 智能指示膜的热稳定性研究

指示膜的热重分析如图 5 所示。试样主要有 3 个失重阶段:80~100 °C 区间失重 5%;260~290 °C

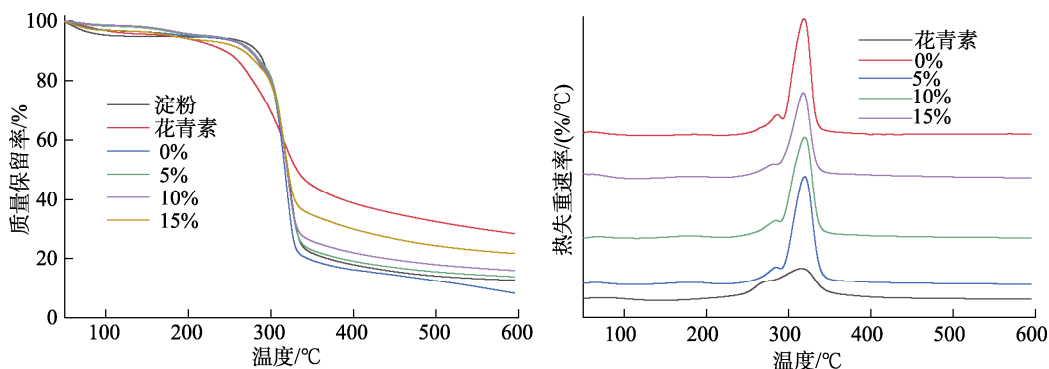


图 5 智能指示膜的热稳定性  
 Fig.5 Thermal stability of intelligent indication film

## 2.6 智能指示膜的分子结构分析

为了探究纺丝过程中花青素的结构是否产生变化,以及其与淀粉纳米纤维的结合方式,对指示膜进行了傅里叶红外变换光谱扫描,结果如图 6 所示。所有样品在  $3\ 300\ \text{cm}^{-1}$  附近均有较宽的强吸收峰,此为—OH 伸缩振动产生的吸收峰。 $2\ 900\ \text{cm}^{-1}$  附近均有中等强度吸收峰,此为—CH<sub>2</sub>—反对称伸缩振动产生。 $1\ 640\ \text{cm}^{-1}$  处的吸收峰是由含氧杂环化合物中类似 C=O 类型的振动所引起。淀粉是

区间失重 12%;290~340 °C 之间失重 60%。

淀粉易吸湿,100 °C 附近水分汽化失重。260~290 °C 时,淀粉发生热分解,产生 CO<sub>2</sub>、水蒸气和少量有机挥发物,质量进一步减少。达到 300 °C 之后,淀粉发生碳化损失大量质量,此后,碳残留物继续缓慢氧化挥发,质量趋于稳定,最终保留 10%左右的质量<sup>[13]</sup>。

花青素在升温到 100 °C 时会失重 5%左右,随后在 240~270 °C 之间失重 10%左右,最后在 270~350 °C 之间损失 40%左右的质量。蓝莓花青素是一种小分子的黄酮和黄烷酮的衍生物,亲水性较好容易吸湿,因此样品中含有少量水分,在热重分析时,达到 100 °C 时水分蒸发导致失重。继续加热到 240~270 °C 时,蓝莓花青素分子开始发生热分解,紧接着在 270~350 °C 时样品发生碳化失去大量质量,随后样品继续缓慢氧化失重,由于样品纯度较低,最后剩余 30%左右的质量。

指示膜的失重阶段整体相同,但随着花青素负载量的增加,指示膜的最终质量保留率也在增加。可能是由于蓝莓花青素样品纯度较低,其中含有较多的灰分,导致纳米纤维膜最终质量保留率的增加。

由多个葡萄糖单元通过糖苷键连接形成的多聚糖,其基本组成单位——葡萄糖分子内有一个六元环状结构,称为吡喃环,由五个碳原子和一个氧原子通过共价键闭合成环。吡喃环中的 C=O 和花青素中的苯环结构振动在此处形成了吸收峰。

花青素样品的吸收峰与指示膜基本相同,仅在  $1\ 517\ \text{cm}^{-1}$  处有一特征吸收峰,且随着花青素负载量的增加,指示膜在相同位置也逐渐产生了一个较弱的吸收峰。可能是花青素中酚羟基的伸

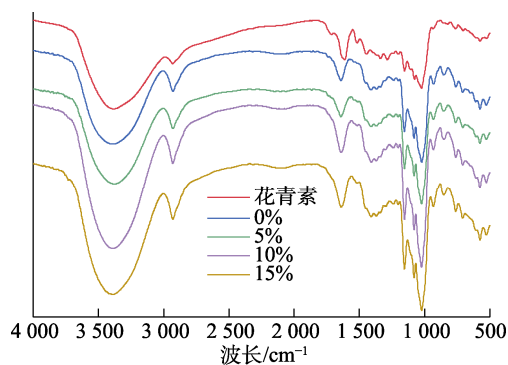


图 6 淀粉花青素智能指示膜的红外光谱

Fig.6 Infrared spectrum of starch anthocyanin intelligent indicator film

缩振动和弯曲振动形成。指示膜的红外光谱相较于花青素未出现新的吸收峰，原有吸收峰并未减

少。因此，静电纺丝过程中，花青素的化学结构并未发生改变，未与淀粉形成共价连接，仅通过分子间相互作用力被包裹在指示膜中。

## 2.7 智能指示膜的 pH 指示性

为了研究指示膜对不同 pH 环境的指示效果，将指示膜浸泡在不同 pH 溶液中进行实验，结果如图 7 所示。指示膜浸泡在不同 pH 溶液中后发生了明显的颜色变化。中性条件下指示膜呈现出紫色，pH 越低则指示膜的颜色越向红色转变，pH 越高则指示膜的颜色向黄色转变。结合表 1 中指示膜的  $\Delta E$  值可以看出，不同 pH 条件下指示膜的  $\Delta E$  值大于 2，表明颜色变化肉眼可见。

表 1 指示膜响应 pH 的  $\Delta E$  值Table 1 The  $\Delta E$  value indicating the film's response to pH

色值	pH						
	2	4	6	7	8	10	12
<i>L</i>	39.77±1.40	66.10±1.35	72.39±1.45	70.17±2.32	76.17±1.02	77.92±0.92	79.90±0.63
<i>a</i>	45.21±1.10	22.41±2.10	12.46±0.86	10.89±0.97	6.84±0.27	7.02±0.67	6.67±0.13
<i>b</i>	15.29±0.49	-1.51±0.10	-2.70±0.40	-2.97±0.62	-5.90±0.20	-4.59±1.37	1.00±1.04
$\Delta E$	38.72±2.65	11.85±2.15	3.60±0.70	7.83±1.58	2.43±0.73	6.15±1.25	

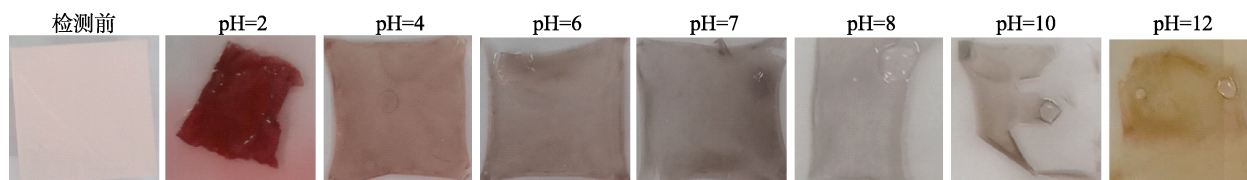


图 7 指示膜在不同 pH 溶液中的颜色

Fig.7 Indicates the color of the film in different pH solutions

指示膜在不同 pH 条件下的颜色变化是由于其中负载的花青素的电离状态发生了变化呈现出不同的颜色导致。当环境中的 pH 值发生变化时  $H^+$  或  $OH^-$  与负载在指示膜上的花青素分子结合促使其结构发生改变，呈现出不同颜色<sup>[7]</sup>。蓝莓花青素是黄酮和黄烷酮的衍生物，其分子结构在酸性环境中以黄烷阳离子形式存在呈现出红色，在 pH 为 6~8 时转变为醌类无水碱呈现出紫色，当 pH 升高到 10 以上时，转变为黄色查尔酮<sup>[15]</sup>。

综上所述，指示膜在酸性环境下呈现红色，酸性越强红色越深，中性条件下指示膜呈现出紫色，碱性条件下呈现黄色。在中性 pH 附近，pH 值相差 1 的条件下指示膜的颜色变化肉眼可见，可以满足用于监测食品变质引起的 pH 变化。

## 2.8 指示膜的挥发性盐基氮指示性

高蛋白食品在变质过程中会产生挥发性含氮化合物，用氨气模拟该过程，检测指示膜的挥发性盐基氮指示性，结果如图 8 所示。随时间延长，容器内氨气浓度不断增加，指示膜的颜色在 5 min 内发生肉眼可见的颜色变化，随后颜色变化逐渐加深。

指示膜先吸收容器中的水分，挥发性氮化合物扩散到指示膜中形成  $NH_3 \cdot H_2O$ ，并分解成  $NH_4^+$  和  $OH^-$  产生碱性环境。由于挥发性氮化合物需要与水结合才能产生碱性环境，因此指示膜的变色速度还与其亲水性有关。指示膜的润湿性较好，亲水性较强，变色速度较快。

综上所述，指示膜具有较好的挥发性盐基氮指示性，5 min 内即可发生肉眼可见的颜色变化。

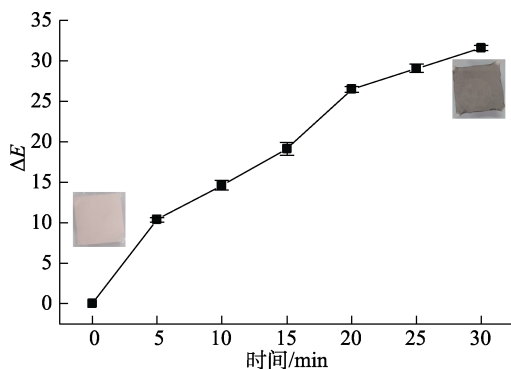


图 8 指示膜对挥发性盐基氮的响应性

Fig.8 Indicates the responsiveness of the film to volatile base nitrogen

## 2.9 指示膜的抗氧化性

DPPH 自由基清除和 ABTS 自由基清除实验是评价物质抗氧化活性的两种常用实验方法。指示膜的抗氧化性测定结果如表 2 所示。指示膜的 DPPH 自由基清除率为 94%; ABTS 自由基清除率为 83%。

表 2 智能指示膜的抗氧化性  
 Table2 Intelligent indication of oxidation resistance of the film

自由基类型	清除率/%	标准差
ABTS	83.09	0.151
DPPH	94.13	0.533

花青素在静电纺丝过程中, 分子结构并未发生变化, 保持了良好的生物活性。花青素的抗氧化性来源于其分子结构中的多个酚羟基和共轭双键系统。花青素是一种类黄酮类化合物, 其分子结构中包含由多个酚基构成的核心结构, 这些酚羟基能提供游离的氢原子, 与自由基结合, 起到抗氧化的作用。综上所述, 指示膜具有良好的抗氧化性, ABTS 和 DPPH 自由基清除率均在 80% 以上, 在延长食品货架期方面有良好前景。

## 3 结论

本文以淀粉为原料花青素作为功能性物质, 通过静电纺丝法, 制备了淀粉花青素智能指示膜并进行表征。结果表明, 随着花青素负载量增加, 纤维平均直径从(194±35) nm 增加到(252±39) nm。指示膜的水接触角也增加到了 44.1°, 但仍具有较好的润湿性。静电纺丝过程会破坏氢键导致结晶度降低, 指示膜的力学性能也随之变化, 结晶度较高的指示膜断裂应力较高, 达到了 12.0 MPa, 但断裂伸长率减小到了 5.8%。指示膜的热稳定性随花青素的加入有所提升。静电纺丝不会改变分

子结构, 花青素中酚羟基的电离状态引起的颜色变化实现了指示性, 酚羟基的还原性实现了指示膜的抗氧化性能。制备的淀粉花青素智能指示膜具有良好的指示性和一定的物理性能, 可以实现对食品品质的监测。

## 参考文献:

- [1] 雷桥, 张文惠. 负载天然色素的生物基智能包装指示器研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(1): 20-31.  
LEI Q, ZHANG W H. Research progress of bio-based intelligent packaging indicator loaded with natural pigments[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(1): 20-31.
- [2] ZHANG C, LI Y, WANG P, et al. Electrospinning of nanofibers: Potentials and perspectives for active food packaging[J]. Compr Rev Food Sci Food Saf, 2020, 19(2): 479-502.
- [3] ZOU Y C, SUN Y F, SHI W J, et al. Dual-functional shikonin-loaded quaternized chitosan/polycaprolactone nanofibrous film with pH-sensing for active and intelligent food packaging[J]. Food Chem, 2023, 399: 11.
- [4] WANG Y X, LIU K, ZHANG M, et al. Sustainable polysaccharide-based materials for intelligent packaging[J]. Carbohydr Polym, 2023, 313: 18.
- [5] XUE J J, WU T, DAI Y Q, et al. Electrospinning and electrospun nanofibers: methods, materials, and applications[J]. Chem Rev, 2019, 119(8): 5298-415.
- [6] MÜLLER D, SCHANTZ M, RICHLING E. High performance liquid chromatography analysis of anthocyanins in bilberries (vaccinium myrtillus l.), blueberries (vaccinium corymbosum l.), and corresponding juices[J]. J Food Sci, 2012, 77(4): C340-C5.
- [7] YANG W J, GUO Y X, LIU M, et al. Structure and function of blueberry anthocyanins: A review of recent advances[J]. J Funct Food, 2022, 88: 15.
- [8] ANDRETTA R, LUCHESE C L, TESSARO I C, et al. Development and characterization of pH-indicator films based on cassava starch and blueberry residue by thermocompression[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 93: 317-24.
- [9] LIN C Y, JUNG J Y, ZHAO Y Y. Cellulose nanofiber-based emulsion coatings with enhanced hydrophobicity and surface adhesion for preserving anthocyanins within thermally processed blueberries packed in aqueous media[J]. J Food Process Eng, 2023, 46(3): 11.
- [10] CAO P P, WU G S, YAO Z J, et al. Effects of amylose and amylopectin molecular structures on starch electrospinning[J]. Carbohydr Polym, 2022, 296: 10.
- [11] VILLWOCK K, BEMILLER J N. The architecture, nature, and mystery of starch granules. part 2[J]. Starch-Starke, 2022, 74(11-12): 17.
- [12] KAUR J, LEE J H, SHOFNER M L. Influence of polymer matrix crystallinity on nanocomposite morphology and properties[J]. Polymer, 2011, 52(19): 4337-44.
- [13] FAN H R, YAO X, CHEN Z J, et al. Interaction of high amylose corn starch with polyphenols: Modulating the stability of polyphenols with different structure against thermal processing[J]. Food Chem, 2024, 437: 8.
- [14] 樊慧娟, 王晶, 张惠. 动态热机械分析在高分子聚合物及复合材料中的应用[J]. 化学与粘合, 2017, 39(2): 132-4.  
FAN H J, WANG J, ZHANG H. Applications of dynamic mechanical thermal analysis in polymers and composite materials[J]. Chemistry and Adhesion, 2017, 39(2): 132-4.
- [15] ZENG F S, ZENG H S, YE Y Q, et al. Preparation of acylated blueberry anthocyanins through an enzymatic method in an aqueous/organic phase: effects on their colour stability and pH-response characteristics[J]. Food Funct, 2021, 12(15): 6821-9.

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。