

花青素-明胶/聚乙烯醇-淀粉复合膜制备与表征

孙理, 李亦欣, 纪祥月, 欧阳瑞灿, 孙百会, 高媛, 李春伟

(东北林业大学 工程技术学院, 哈尔滨 150040)

摘要: **目的** 制备花青素明胶/聚乙烯醇淀粉双层复合膜, 以期提高花青素单层膜的综合性能。**方法** 采用流延法分别制备紫薯、紫甘蓝、黑米、黑枸杞、玫瑰、玫瑰茄等 6 种花青素明胶/聚乙烯醇淀粉双层复合膜, 并对比研究膜层的微观组织结构、含水率、力学性能及光学性能。**结果** 从红外光谱图中可以看出, 双层复合膜分子结构没有出现新的特征峰, 双层膜结合方式为物理结合, 没有新的结构生成, 且除紫甘蓝明胶/聚乙烯醇淀粉双层复合膜外, 其余复合膜均存在明显的分层界线, 2 层结合处膜层结构均匀致密, 结合良好。不同双层膜的含水率差异显著, 而双层复合膜比花青素单层膜的含水率明显降低, 不同双层膜的拉伸强度和断裂伸长率差异不显著, 与单层花青素明胶复合膜相比, 双层复合膜的拉伸强度和断裂伸长率大幅增加, 其中紫薯双层膜的拉伸强度增加了 75%, 断裂伸长率增加了 22.9%; 所有双层复合膜的透光率相差不大, 均在 80% 以上; 与花青素明胶单层膜相比, 双层膜的雾度增加了 20% 左右。**结论** 制备的双层膜改善了单层膜的力学性能, 提高了花青素明胶单层膜的综合性能。

关键词: 花青素; 明胶; 聚乙烯醇; 淀粉; 双层膜

中图分类号: TB484.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)23-0109-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.23.015

Preparation and Characterization of Anthocyanin-Gelatin/Polyvinyl-Alcohol-Atarch Bilayer Composite Film

SUN Li, LI Yi-xin, JI Xiang-yue, OUYANG Rui-can, SUN Bai-hui, GAO Yuan, LI Chun-wei

(School of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare anthocyanin gelatin/polyvinyl alcohol starch bilayer composite film, so as to improve the comprehensive performance of anthocyanin monolayer film. Six kinds of anthocyanin gelatin/polyvinyl alcohol starch bilayer composite films were prepared by layer-by-layer stretch film technology with purple potato, purple cabbage, black rice, black wolfberry, rose and roselle. Then, the microstructure, moisture content, mechanical properties and optical properties of these films were compared and studied. From the infrared spectroscopy, the molecular structure of the material in the bilayer composite film was mainly the intermolecular force, and no new structure was generated. Except the purple cabbage gelatin/polyvinyl alcohol starch bilayer composite film, the other composite films had obvious delamination boundary, but the film structure at the junction of the two layers was uniform and compact, with good binding effect. The moisture content of different bilayer films was significantly different, while the moisture content of bilayer

收稿日期: 2021-04-02

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(LH2019E001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2572018BL09); 东北林业大学大学生科研训练计划(KY202130)

作者简介: 孙理(1997—), 男, 东北林业大学硕士生, 主攻智能包装。

通信作者: 李春伟(1981—), 男, 东北林业大学副教授, 主要研究方向为智能包装与功能薄膜。

composite film was significantly lower than that of anthocyanin monolayer film. There was no significant difference in tensile strength and elongation at break among different bilayer films. Compared with the monolayer anthocyanin gelatin composite film, the tensile strength and elongation at break of the bilayer composite film greatly increased, among which the tensile strength increased by 75% and elongation at break of the purple potato bilayer film increased by 22.9%. The light transmittance of all the bilayer composite films had little difference, all of which were above 80%. The haze of bilayer film increased by about 20% compared with anthocyanin gelatin monolayer film. The prepared bilayer film improves the mechanical properties of monolayer film and enhances the comprehensive properties of anthocyanin gelatin monolayer film.

KEY WORDS: anthocyanin; gelatin; polycinyl alcohol; starch; bilayer film

花青素作为一种天然色素,其颜色会随着 pH 值的改变发生相应的变化。人们根据花青素颜色随 pH 值变化这一特性,将其作为智能包装的指示剂,以反映食品的新鲜程度^[1-4]。目前,食品新鲜度智能包装的指示剂大多采用花青素^[5-7]。Li 等^[8]将紫薯花青素添加至壳聚糖和表面脱乙酰几丁质纳米纤维中,开发了一种新型的 pH 指示智能包装,结果表明,表面脱乙酰几丁质纳米纤维的加入使壳聚糖膜的拉伸强度耐水性得到明显提高。Halasz 等^[9]将黑莓果花青素添加至壳聚糖中制备 pH 敏感的新鲜度指示膜,研究发现,黑莓果提高了壳聚糖膜的耐水性,可以将其用于监测容易在酸性条件下变质的食品。Yong 等^[10]将紫薯花青素添加至壳聚糖基中制备智能指示膜,研究发现,紫薯花青素明显增强了壳聚糖膜的水溶性和热稳定性,但含水量和断裂伸长率均有所降低。王艳娟^[11]将紫甘蓝色素添加至壳聚糖和木薯淀粉中制备新鲜度指示标签,研究发现,色素与成膜基质之间有很好的相容性,力学性能也得到了改善。

随着研究的深入,人们发现天然花青素在新鲜度指示的智能包装领域中应用时存在一些问题:天然花青素在与其他物质复合时,可能存在稳定性较差、容易受光作用降解、容易被氧气氧化等问题,限制其推广应用^[12];智能指示标签功能单一,仅具有新鲜度指示功能;单层新鲜度智能指示膜的力学性能、耐水性、稳定性较差,综合性能有待进一步提高。

基本上述问题,文中采用逐层组装技术制备花青素明胶/聚乙烯醇淀粉双层复合膜,通过分析 6 种双层复合膜的微观组织结构、物理性能、力学性能及光学性能等,获得 1 种综合性能优越的智能指示包装膜,可为花青素在智能包装领域的进一步推广应用提供理论依据。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料:紫薯、紫甘蓝、黑米、黑枸杞、玫瑰、玫瑰茄,均购自哈尔滨家乐福超市;明胶,生化试剂,天津市恒兴化学试剂制造有限公司;可溶性淀粉,天

津市恒兴化学试剂制造有限公司;聚乙烯醇 1799 型,醇解度(用摩尔分数表示)为 98%~99%,上海麦林生化科技有限公司;无水乙醇,分析纯,丙三醇分析纯,天津市富宇精细化学有限公司;其他试剂均为分析纯。

主要仪器:90-4,数显控温磁力搅拌器,上海振捷实验设备有限公司;FA2004B,电子天平,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;SB-800D,超声波清洗机,宁波新芝生物科技股份有限公司;B260,恒温水浴锅,上海亚荣生化仪器厂;BSY-200T,直立式多功能粉碎机,永康市铂欧五金制品有限公司;HWS-250B,恒温恒湿干燥箱,天津市泰斯特仪器有限公司;SDH-25055GT,台式鼓风干燥箱,上海岛纯实业有限公司。

1.2 方法

1.2.1 复合膜的制备

1) 内层花青素复合膜的制备。称取一定量的明胶溶于蒸馏水中,得到质量分数为 4%的明胶溶液,然后分别将 6 种花青素提取液加入明胶溶液中,加入的花青素提取液体积占膜液的 10%,在膜液中加入丙三醇(添加量为明胶干物质质量的 10%)作为增塑剂,在室温下搅拌 30 min,使其混合均匀,再使用超声波清洗机脱除气泡 10 min,最后将溶液缓慢流延在培养皿中,于室温下干燥 36 h 成膜。

2) 外层聚乙烯醇/淀粉膜的制备。称取一定量聚乙烯醇添加到蒸馏水中,在 90 °C 下水浴加热 2 h 直至成透明的溶液,得到质量分数为 2%的聚乙烯醇溶液。称取一定量的淀粉加入蒸馏水中,在 80 °C 水浴锅中搅拌 30 min 使其糊化,得到质量分数为 2%的淀粉溶液。按照 1:4 的体积比将淀粉溶液加入聚乙烯醇溶液中,在 40 °C 条件下搅拌混合均匀,然后缓慢地流延在花青素内层膜上,于室温下干燥后揭膜。

1.2.2 复合膜的微观结构

1.2.2.1 薄膜的傅里叶红外光谱

使用 Perkin Elmer 公司的 frontier 型傅里叶变换红外光谱仪,对薄膜样品采用全反射法进行扫描测

定,扫描范围为 $4000\sim 500\text{ cm}^{-1}$ 。

1.2.2.2 薄膜的表面及断面形貌

使用 QUANTA200 扫描电子显微镜,对薄膜样品表面和断面进行观察拍照。表面观察需要先进行喷金处理,断面观察需要用液氮进行淬断处理。

1.2.3 复合膜的物理性能

1.2.3.1 膜厚

使用数显千分尺对薄膜进行随机采样,测试 6 个采样点的厚度平均值作为膜的厚度。

1.2.3.2 含水率

参照文献[13]的方法测试薄膜的含水率,将质量为 m_1 的薄膜放入烘箱中,在温度为 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干至质量恒定,取出后薄膜的质量为 m_2 ,每种薄膜测试 3 个平行试样,取平均值作为薄膜的含水率,含水率的计算见式(1)。

$$MC = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: MC 为薄膜含水率; m_1 为膜的原质量(g); m_2 为烘干后膜的质量(g)。

1.2.3.3 力学性能

使用 LD-05 型大神电脑测控拉力试验机对薄膜进行拉伸测试实验,根据 GB/T 1040.2—2006^[14],将薄膜裁成 $150\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的标准样品,并测试样品的厚度,将样品放置在标准环境中预处理 48 h。测试时设置好实验参数:拉伸速度为 10 mm/min ,标距为 40 mm ,每种薄膜测试 5 个平行实验,取平均值作为最终结果。按照式(2—3)计算拉伸强度和断裂伸长率。

$$\sigma_t = \frac{p}{b \times d} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{x}{L_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: σ_t 为待测薄膜试样的拉伸强度(MPa); p 为待测薄膜试样在拉伸断裂过程中的最大载荷(N); b 为薄膜试样的宽度(mm); d 为薄膜试样的厚度(mm); ε 为薄膜试样的断裂伸长率(%); x 为薄膜试样断裂时发生的位移(mm); L_0 为薄膜试样的长度(mm)。

2 结果与分析

2.1 复合膜的膜厚

不同提取物的花青素明胶膜以及双层膜的厚度见图 1。由图 1 可知,不同提取物的花青素明胶膜的厚度有所不同,6 种花青素明胶膜厚度依次为黑枸杞明胶膜>玫瑰明胶膜>紫薯明胶膜>玫瑰茄明胶膜>黑米明胶膜>紫甘蓝明胶膜。黑枸杞明胶膜的厚度最大,为 $68.82\text{ }\mu\text{m}$,紫甘蓝明胶膜的厚度最小,为 $43.87\text{ }\mu\text{m}$ 。膜的厚度与其成分组成有关,其原因可能是不同提取

物花青素的酚羟基数目与位置不同,与明胶间的相互作用力有所不同。另外,在内层膜的表面流延一层聚乙烯醇/淀粉膜得到双层复合膜,聚乙烯醇/淀粉膜的厚度为 $26.63\text{ }\mu\text{m}$ 。由图 1 可知,不同种类的双层智能保鲜膜的厚度有所不同,其原因可能是花青素明胶内层膜厚不同导致,也可能是由花青素明胶膜与聚乙烯醇淀粉膜双层膜间的结合效果不同所影响。

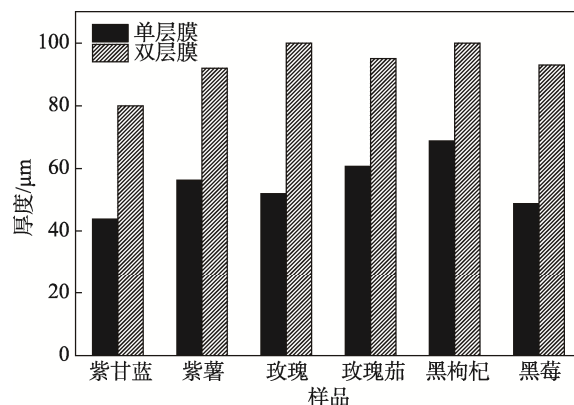


图 1 单/双层复合膜的厚度

Fig.1 Thickness of monolayer/bilayer composite film

2.2 复合膜的 FTIR 分析

紫甘蓝明胶膜、聚乙烯醇淀粉膜和紫甘蓝明胶/聚乙烯醇淀粉膜的傅里叶红外光谱见图 2。由图 2 可知,相比紫甘蓝明胶单层膜,紫甘蓝明胶/聚乙烯醇淀粉双层膜的红外光谱图没有出现新的特征峰,但是双层膜的峰明显向高波数移动,可能是由于薄膜分子间氢键的作用^[15]。紫甘蓝明胶膜在 3241 cm^{-1} 处的吸收峰为 —NH 键的伸缩振动,聚乙烯醇淀粉膜在 3276 cm^{-1} 处的吸收峰为 —OH 的伸缩振动,而紫甘蓝明胶/聚乙烯醇淀粉双层膜的吸收峰位置移动到 3235 cm^{-1} 处,可能是双层膜之间分子间存在相互作用(氢键)。紫甘蓝明胶复合膜在 1633 cm^{-1} 处表示 $\text{C}=\text{C}$ 键振动,

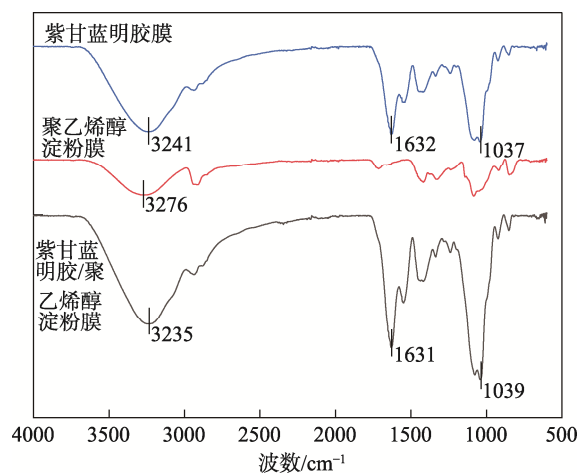


图 2 不同膜层的傅里叶红外光谱

Fig.2 FT-IR of different films

是花青素提取物中芳香族化合物的特征吸收峰。紫甘蓝明胶/聚乙烯醇淀粉复合膜的吸收峰移至 1631 cm^{-1} 处有明显的增强和偏移, 1037 cm^{-1} 处吸收峰为聚乙烯醇淀粉膜中 C—O 的伸缩振动是甘油的吸收峰。

复合膜的傅里叶红外光谱见图 3。由图 3 可知, 所制备的 6 种双层复合膜的 FTIR 图中的主要吸收峰基本一致, 并无新的特征峰出现, 仅仅存在吸收峰强度的差别。结合图 2 的结果可知, 双层复合膜主要存在分子间的作用力, 并没有发生化学反应。该结果与邹小波等^[15]对桑葚花青素双层膜的 FTIR 分析结果相类似, 因此, 这 6 种双层膜的明显差别即为吸收峰的强度。玫瑰茄双层膜的各个吸收峰强度明显低于其他双层膜的强度, 原因可能是玫瑰茄花青素的矢车菊素-3-葡萄糖苷与其他物质之间的分子间作用力异于其他^[16]。

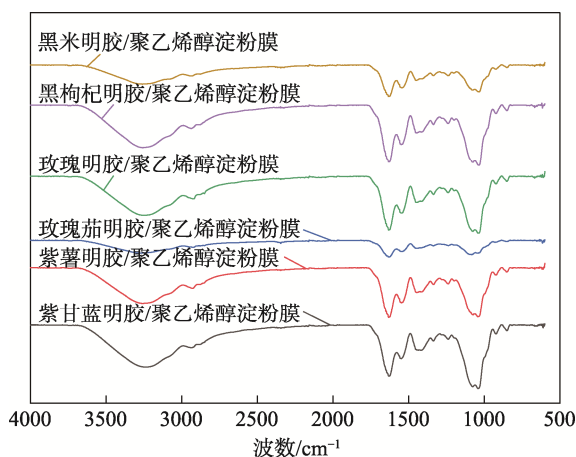


图 3 6 种花青素双层复合膜的傅里叶红外光谱
Fig.3 FT-IR of six kinds of anthocyanin bilayerfilms

2.3 复合膜的 SEM 分析

复合膜的断面 SEM 见图 4。由图 4a 可知, 膜层断面致密均匀、平整, 无分层现象, 说明紫甘蓝明胶和聚乙烯醇淀粉 2 层膜混合形成了 1 层。可能是由于制备紫甘蓝明胶膜时上层流延液(聚乙烯醇淀粉共混液)温度较高, 导致紫甘蓝明胶膜溶解在聚乙烯醇淀粉共混液中, 成膜后变成了一层膜。由图 4b 可知, 膜层断面呈现出清晰完整的双层膜特征, 整个膜层表现为上、下 2 层, 2 层膜中均未出现气孔、断痕和聚集。由图 4c 可知, 双层膜的上、下 2 层结构特征不同, 未出现明显的分层线。双层膜中的玫瑰茄明胶膜层中存在较多的气孔, 且分布不均匀, 与玫瑰茄明胶膜膜相比, 断面结构中的断痕已消失。双层膜的存在改善了单层膜的结构, 可能是因为 2 层膜之间发生了相互作用力。由图 4d 可知, 双层膜中上、下 2 层具有清楚、规则的分界线。双层膜的断面平整, 内部分布均匀、结构紧密, 无气孔、断痕等缺陷。由图 4e

可知, 双层膜中的 2 层分界线较为明显, 2 层膜的结构特征完全不同。其中, 黑枸杞双层膜的断面粗糙, 黑枸杞明胶膜存在较大的气孔。双层膜并没有很好地改善玫瑰明胶和聚乙烯醇淀粉每层膜的结构。由图 4f 可知, 虽然双层膜中并没有存在明显的分层线, 但是上、下 2 层膜的结构特征却存在区别。其中, 黑米明胶膜存在少量的气孔, 而聚乙烯醇淀粉膜的结构致密。

2.4 复合膜的含水率分析

复合膜的含水率见图 5, 其中聚乙烯醇淀粉外层膜的含水率为 15.34%。由图 5 可知, 与花青素单层膜的含水率相比, 除了黑枸杞和黑米双层膜外, 其余双层复合膜的含水率均显著降低。其中, 紫甘蓝双层膜和紫薯双层膜的含水率下降幅度最为明显, 紫甘蓝单层膜的含水率为 17.6%, 而紫甘蓝双层膜的含水率为 8.7%与单层膜相比降低了 8.9%; 紫薯单层膜的含水率为 14.1%, 而紫薯双层膜的含水率为 5.6%与单层膜相比降低了 8.5%。综上所述, 可能是因为聚乙烯醇淀粉外层膜与花青素明胶内层膜之间形成了更多的氢键, 使双层膜结构更加稳定, 并且抑制了水分子之间的交联, 所以双层膜的含水率明显降低^[17]。

2.5 复合膜的力学性能分析

样品的拉伸强度见图 6, 其中聚乙烯醇淀粉膜的拉伸强度为 37.4 MPa。由图 6 可知, 花青素明胶双层膜的拉伸强度比花青素明胶单层膜明显增强, 紫甘蓝、紫薯、玫瑰茄、玫瑰、黑枸杞和黑米双层膜分别比对应的花青素明胶单层膜分别增加了 64.7%, 75%, 65.5%, 51.8%, 54.7%和 60.9%, 分析认为, 双层膜的拉伸强度显著提高归因于花青素明胶膜与聚乙烯醇淀粉膜复合后, 双层膜的分子间作用力更强、结构更加紧密, 赋予了双层复合膜更高的拉伸强度。此外, 6 种双层膜的拉伸强度差异不大, 按拉伸强度依次为: 玫瑰明胶/聚乙烯醇淀粉双层膜>玫瑰茄/聚乙烯醇淀粉双层膜>黑枸杞/聚乙烯醇淀粉双层膜>黑米/聚乙烯醇淀粉双层膜>紫甘蓝/聚乙烯醇淀粉双层膜>紫薯/聚乙烯醇淀粉双层膜。其中, 玫瑰/聚乙烯醇淀粉双层膜的拉伸强度最大, 为 29.3 MPa; 紫薯/聚乙烯醇淀粉双层膜拉伸强度最小, 为 19.4 MPa。

样品的断裂伸长率见图 7, 其中聚乙烯醇/淀粉膜的断裂伸长率为 20.0%。由图 7 可知, 花青素明胶双层膜的断裂伸长率比单层膜显著提高, 紫甘蓝、紫薯、玫瑰茄、玫瑰、黑枸杞和黑米双层复合膜分别增加了 15.3%, 22.9%, 16.5%, 14.5%, 11.9%和 14.3%。分析认为, 双层膜断裂伸长率的提高主要归因于聚乙烯醇淀粉外层膜的存在, 以及与花青素明胶膜的分子间的相互作用力增强有关。此外, 不同双层复合膜的断裂伸长率差异不大, 按断裂伸长率依次为: 玫瑰>

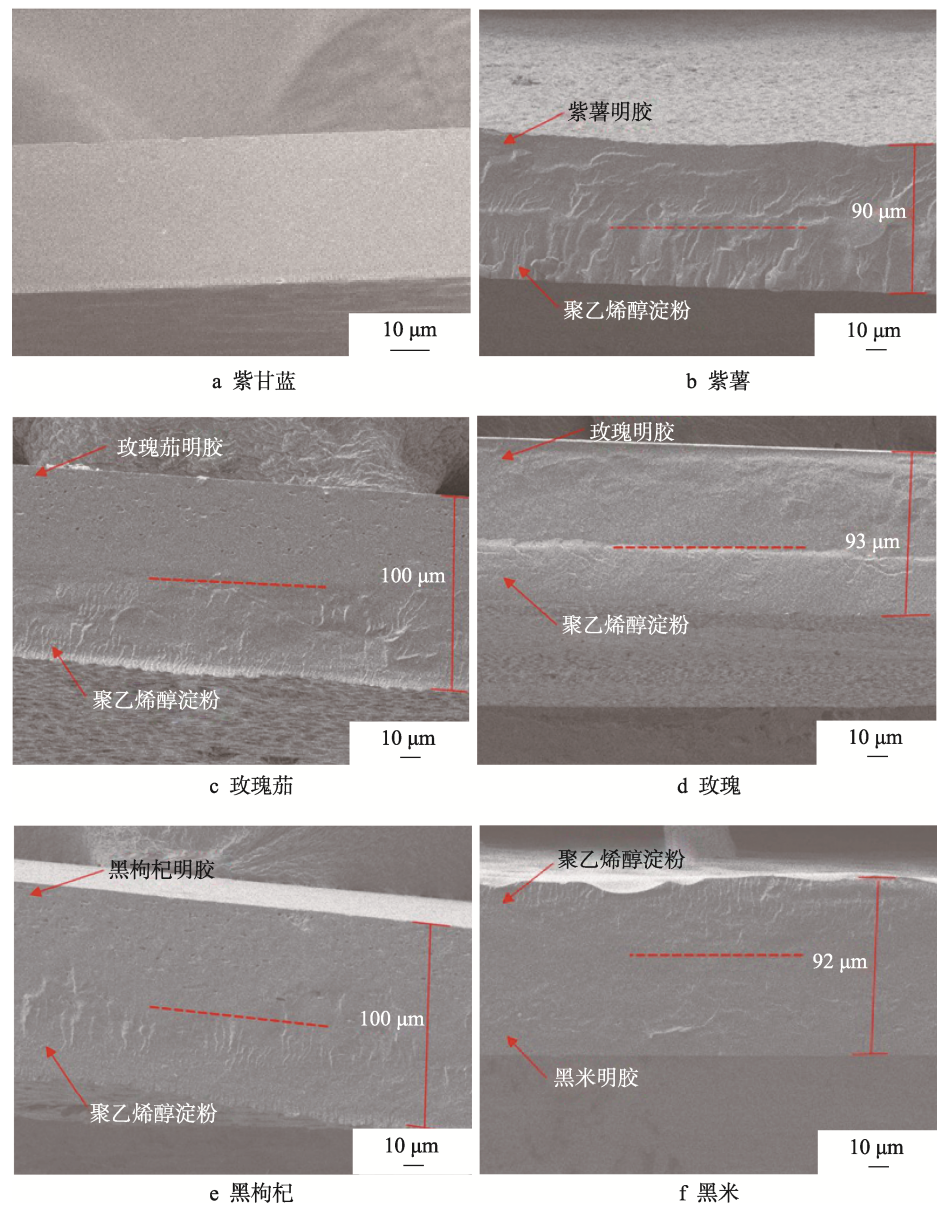


图 4 6 种花青素双层复合膜的断面 SEM
Fig.4 SEM photo of six kinds of anthocyanin bilayerfilms

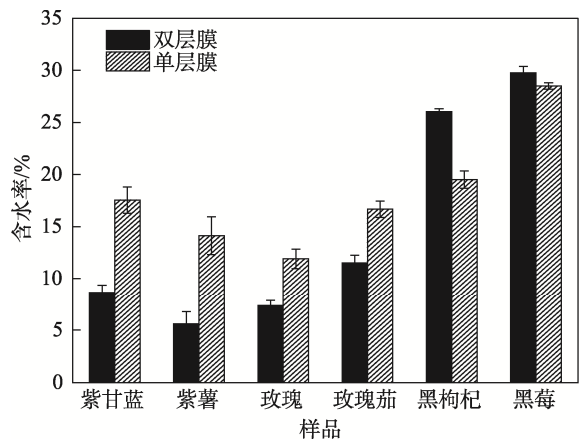


图 5 复合膜的含水率
Fig.5 Moisture content of composite film

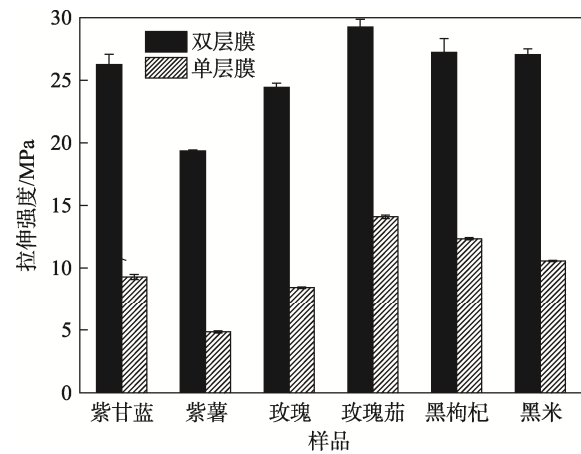


图 6 复合膜的拉伸强度
Fig.6 Moisture content of composite film

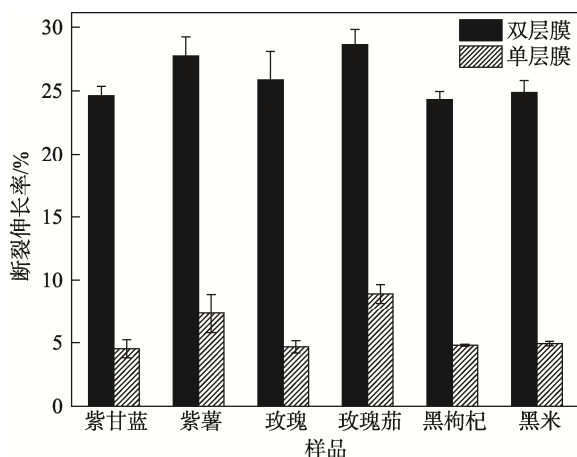


图 7 复合膜的断裂伸长率

Fig.7 Elongation at break of composite film

紫薯花青素明胶/聚乙烯醇淀粉双层复合膜>玫瑰茄花青素明胶/聚乙烯醇淀粉双层复合膜>黑米花青素明胶/聚乙烯醇淀粉双层复合膜>紫甘蓝花青素明胶/聚乙烯醇淀粉双层复合膜>黑枸杞花青素明胶/聚乙烯醇淀粉双层复合膜。其中，玫瑰茄花青素明胶/聚乙烯醇淀粉双层复合膜的断裂伸长率最大，为 28.6%；黑枸杞花青素明胶/聚乙烯醇淀粉双层复合膜的断裂伸长率最小，为 24.3%。

2.6 复合膜的光学性能分析

根据 GB 2410—80^[18]对复合膜进行透光率和雾度检测，发现紫甘蓝、紫薯、玫瑰茄、玫瑰、黑枸杞和黑米花青素明胶/聚乙烯醇淀粉复合膜的透光率分别为 82.3%，80.8%，82.9%，83%，81.8%和 81.6%。不同种类的双层复合膜的透光率差异不大，均在 80%~83%，表明聚乙烯醇淀粉膜的添加对明胶花青素膜的透光率影响较小。

紫甘蓝、紫薯、玫瑰茄、玫瑰、黑枸杞和黑米花青素明胶/聚乙烯醇淀粉复合膜的雾度分别为 57.9%，63.1%，38%，43.4%，53.6%和 44.8%。不同种类的双层复合膜雾度差异显著，与明胶花青素单层膜相比，双层复合膜的雾度明显增加，可能是由于聚乙烯醇淀粉膜与明胶花青素膜的雾度产生了叠加效果所致。

2.7 复合膜的 pH 值响应性分析

紫甘蓝明胶/聚乙烯醇淀粉复合膜在不同 pH 值下的响应性见图 8。由图 8 可知，该复合膜在不同 pH 值下呈现出不同颜色，这表明该复合膜对 pH 有较好的响应性。当 pH 值为 1 时，复合膜为粉红色；pH 值为 3 和 5 时，复合膜颜色逐渐变为浅粉红色；pH 值为 7 时，复合膜颜色为浅绿色；pH 值为 9, 11, 13 时，复合膜颜色依次变为深浅不同的棕黄色。综上所述，在酸性条件下（pH 值为 1~5），花青素主要以黄盐阳离子（红色）的形式存在，形成了紫色或

红色的颜色变化。当 pH 值为 7 时，花青素以蓝色醌型碱为主，随着 pH 值升高，黄盐阳离子的浓度和颜色强度会降低，经过水合作用后生成无色的假碱和查耳酮。当 pH 值大于 9 时，花青素在强碱环境下被降解，不同的取代基降解后产生了不同的产物，颜色变为棕黄色^[19]。

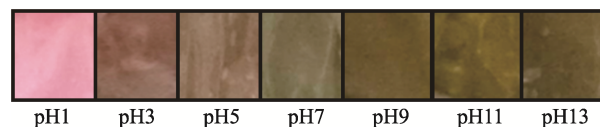


图 8 紫甘蓝明胶/聚乙烯醇淀粉复合膜不同 pH 值的颜色

Fig.8 Color of purple cabbage gelatin/polyvinyl alcohol starch composite film at different PH values

3 结语

针对单层花青素复合膜的问题，制备了一种花青素明胶/聚乙烯醇淀粉双层智能包装复合膜，该双层智能包装膜具有以下优点。

1) 新鲜度指示性能稳定。聚乙烯醇淀粉复合膜作为外层保护膜，可以提供保护，进而有助于花青素复合膜的稳定性。

2) 功能拓展。花青素明胶内层复合膜提供新鲜度指示功能，聚乙烯醇淀粉外层复合膜提供保鲜功能。

3) 综合性能优异。双层复合膜的力学强度、气密性和耐水性均有所提升。

相关研究结论如下所述。

1) 6 种花青素明胶/聚乙烯醇淀粉双层复合膜的红外光谱中的主要吸收峰所在位置相同而强度不同。与单层膜相比，双层复合膜的红外光谱图没有出现新的特征峰，表明双层复合膜属于物理结合。

2) 6 种花青素明胶/聚乙烯醇淀粉双层复合膜的断面形貌差异显著。除紫甘蓝明胶/聚乙烯醇淀粉双层复合膜外，其余复合膜均存在明显的 2 层分层界线，但 2 层结合处膜层结构均匀致密，结合良好。

3) 6 种花青素明胶/聚乙烯醇淀粉双层复合膜的含水率差异显著，紫薯双层膜含水率最低，为 5.6%；双层复合膜比明胶花青素单层膜的含水率明显降低，紫甘蓝双层膜降低了 8.9%，紫薯双层膜降低了 8.5%。

4) 6 种花青素明胶/聚乙烯醇淀粉双层复合膜的拉伸强度和断裂伸长率差异不显著。与花青素明胶膜相比，双层复合膜的拉伸强度和断裂伸长率大幅增加，其中紫薯双层膜的拉伸强度增加了 74.99%，断裂伸长率增加了 22.9%。

5) 6 种花青素明胶/聚乙烯醇淀粉双层复合膜的透光率相差不大，均在 80%~87%。与花青素明胶单层膜相比，双层膜的雾度明显增加了 20%左右。

参考文献:

- [1] 刘东红, 吕飞, 叶兴乾. 食品智能包装体系的研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 286—290.
LIU Dong-hong, LYU Fei, YE Xing-qian. Overview on Food Intelligent Packaging System[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(8): 286—290.
- [2] 贾惜文, 王浩, 曹传爱, 等. 颜色指示型智能包装监测生鲜肉新鲜度的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 318—324.
JIA Xi-wen, WANG Hao, CAO Chuan-ai, et al. Research Advances in Application of Color Indicator Intelligent[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(6): 318—324.
- [3] LEE K, BAEK S, KIM D, et al. A Freshness Indicator for Monitoring Chicken-Breast Spoilage Using a Tyvek® Sheet and RGB Color Analysis[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019(19): 40—46.
- [4] RUKCHON C, ATCAREEYA N, SUDSAI T, et al. Development of a Food Spoilage Indicator for Monitoring Freshness of Skinless Chicken Breast[J]. Talanta, 2014(130): 547—554.
- [5] 王冰雪, 宋向颖, 张爱武, 等. 猪肉新鲜度溴甲酚紫基指示卡的研究[J]. 包装与食品机械, 2014, 32(6): 18—21.
WANG Bing-xue, SONG Xiang-ying, ZHANG Ai-wu, et al. Development of Indicating Cards for Freshness of Pork Based on Bromocresol Purple[J]. Packaging and Food Machinery, 2014, 32(6): 18—21.
- [6] HUANG X W, ZOU X B, ZHAO J W, et al. Sensing the Quality Parameters of Chinese Traditional Yao-Meat by Using a Colorimetric Sensor Combined with Genetic Algorithm Partial Least Squares Regression[J]. Meat Science, 2014, 98(2): 203—210.
- [7] BENVENUTI S, BORTOLOTTI E, MAGGINI R. Antioxidant Power, Anthocyanin Content and Organoleptic Performance of Edible Flowers[J]. Scientia Horticulturae, 2016(199): 170—177.
- [8] LI Y, YING Y B, ZHOU Y Q, et al. A pH-Indicating Intelligent Packaging Composed of Chitosan-Purple Potato Extractions Strengthened by Surface-Deacetylated Chitin Nanofibers[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019(127): 376—384.
- [9] HALASZ K, CSOKA L. Black Chokeberry (Aronia melanocarpa) Pomace Extract Immobilized in Chitosan for Colorimetric pH Indicator Film Application[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2018(16): 185—193.
- [10] YONG H M, WANG X C, BAI R, et al. Development of Antioxidant and Intelligent pH-Sensing Packaging Films by Incorporating Purple-Fleshed Sweet Potato Extract into Chitosan Matrix[J]. Food Hydrocolloids, 2019(90): 216—224.
- [11] 王艳娟. 用于鹿肉新鲜度检测的天然色素指示标签的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019: 20—30.
WANG Yan-juan. Study on Natural Pigment Indicator Labels for Venison Freshness Detection[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019: 20—30.
- [12] 吴敏, 张杰, 曾凡骏. 天然花青素稳定性研究现状[J]. 中国食品添加剂, 2008(5): 50—53.
WU Min, ZHANG Jie, ZENG Fan-jun. The Current Stability Situation of Anthocyanins[J]. China Food Additives, 2008(5): 50—53.
- [13] 邹小波, 王圣, 石吉勇, 等. 天然花青素提取物与壳聚糖明胶复合膜的制备和表征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 294—300.
ZOU Xiao-bo, WANG Sheng, SHI Ji-yong, et al. Preparation and Characterization of Chitosan/Gelatin Composite Films Incorporated with Four Natural Pigments[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(17): 294—300.
- [14] GB/T1040.2—2006, 塑料拉伸性能的测定[S].
GB/T1040.2—2006, Determination of Tensile Properties of Plastics[S].
- [15] 邹小波, 薛瑾, 黄晓玮, 等. 一种双层智能膜的制备及在指示三文鱼新鲜度中的应用[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 206—212.
ZOU Xiao-bo, XUE Jin, HUANG Xiao-wei, et al. Development and Application of an Intelligent Bi-layer Packaging Film as a Freshness Indicator for Salmon[J]. Food Science, 2019, 40(23): 206—212.
- [16] 李敏. 不同花青素提取物的组成、稳定性及抗氧化性比较研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2013: 25—42.
LI Min. Study on Component Analysis, Stability and Oxidation Resistance of Different Anthocyanins[D]. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics, 2013: 25—42.
- [17] YANG H, WEN X L, GUO S G, et al. Physical, Antioxidant and Structural Characterization of Blend Films Based on Hsian-tsao Gum (HG) and Casein (CAS)[J]. Carbohydrate Polymers, 2015(134): 222—229.
- [18] GB 2410—80, 透明塑料透光率和雾度试验方法[S].
GB 2410—80, Test Method for Transmittance and Haze of Transparent Plastics[S].
- [19] 石双妮, 田迪英, 孟岳成, 等. 紫薯花色苷热稳定性研究[J]. 食品科技, 2014, 39(11): 221—224.
SHI Shuang-ni, TIAN Di-ying, MENG Yue-cheng, et al. Degradation Kinetics of Anthocyanins in Purple Sweet Potato[J]. Food Science and Technology, 2014, 39(11): 221—224.