

先进材料

壳聚糖/明胶/苹果多酚复合膜的制备及性能研究

石洁, 王雪嵘, 徐朝阳

(南京林业大学 材料科学与工程学院, 南京 210037)

摘要: **目的** 以壳聚糖、明胶、苹果多酚为基材, 制备一种具有优良性能的绿色环保复合材料。**方法** 用溶液共混法制备壳聚糖/明胶/苹果多酚共混膜, 用土埋法测试其降解性, 用红外光谱 (FT-IR)、X 射线衍射仪 (XRD)、扫描电镜 (SEM) 等对其进行表征, 并对其力学性能等进行测试。**结果** 壳聚糖/明胶/苹果多酚复合膜的机械强度随苹果多酚的添加量的增加先变大后减小, 当苹果多酚添加量为 1% 时有较好的拉伸强度; 壳聚糖、明胶、苹果多酚三者具有良好的相容性; 复合膜生物降解性良好。**结论** 引入合适比例的苹果多酚可有效提升复合膜的力学性能, 制得的可降解复合膜在绿色食品包装领域有广泛的应用前景。

关键词: 壳聚糖; 明胶; 苹果多酚; 力学性能; 可降解性; 复合食品包装膜

中图分类号: TB484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)01-0001-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.01.001

Preparation and Properties of Chitosan/Gelatin/Apple Polyphenol Composite Films

SHI Jie, WANG Xue-rong, XU Zhao-yang

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare a green composite film with excellent properties based on chitosan, gelatin and apple polyphenols. A chitosan / gelatin / apple polyphenol blending film was prepared by solution mixing. Its degradability was tested by the soil embedding method. It was characterized by infrared spectroscopy, X-ray diffractor and scanning electron microscopy. And its mechanical properties were also tested. The results showed that the mechanical strength of chitosan / gelatin and apple polyphenol composite films increased first and then decreased with the addition of apple polyphenols, with better tensile strength at 1%; chitosan, gelatin and apple polyphenols had good compatibility; the composite film had good biodegradability. Adding appropriate proportion of apple polyphenols can effectively improve the mechanical properties of the composite film. The prepared biodegradable composite film has a wide application prospect in green food packaging.

KEY WORDS: chitosan; gelatin; apple polyphenol; mechanical property; degradability; composite food packaging films

壳聚糖 (CS) 是一类存量极为丰富的天然大分子多糖, 由甲壳素脱乙酰化得到, 它安全无毒、可生物降解、具有一定的抗菌性能以及良好的成膜性能, 因此壳聚糖被广泛应用于食品包装膜领域^[1-2], 但在

力学性能、阻隔性能以及抗菌性能方面, 单一组分的壳聚糖薄膜仍存在一些缺陷, 例如质脆、易碎、遇水容易水解等, 不能直接运用于食品包装, 因此以壳聚糖作为基质、复合其他助剂以增强壳聚糖薄膜综合性

收稿日期: 2022-03-05

基金项目: 国家自然科学基金 (32171706); 江苏省大学生实践创新训练计划项目 (202010298001Z)

作者简介: 石洁 (2000—), 女, 本科生, 主攻可降解包装材料。

通信作者: 徐朝阳 (1979—), 男, 教授, 主要研究方向为生物质复合材料。

能的复合膜成为近年的研究重点^[3]。

明胶 (GE) 是一种水溶性多肽混合物, 可溶于 70 °C 的热水, 通常由动物结缔组织中富含的胶原蛋白经过水解得到, 其来源广泛、价格低廉、天然无毒、可绿色降解、具有良好的生物相容性^[4]。在冷水中明胶基于其独特的三螺旋结构可与水分子形成稳定的网络结构, 可作为良好的成膜基质^[5], 但是与壳聚糖类似, 单一明胶制成的薄膜存在质脆易断裂、韧性差、易吸水等缺陷, 大大限制了其作为包装膜的应用, 通过有目的地与其他高分子化合物的混合可改善明胶薄膜的力学性能、阻水性能等, 制得各方面性能俱佳的复合薄膜^[6]。在酸性条件下, 壳聚糖由于 $-NH_2$ 基团的存在, 易结合氢离子而带正电荷, 而明胶大分子具有大量负电荷, 加入明胶会使壳聚糖的结晶度降低, 提高其成膜性, 因此将二者复合能改善单膜的力学性能并且降低单膜的水溶性^[7]。

苹果多酚 (AP) 由苹果中的酚酸、黄烷三醇、黄酮醇类、二氢查尔酮类以及花青素类等酚类化合物组成, 作为代谢产物及主要活性成分大量存在于苹果中^[8], 它有分子质量小、结构多样、易溶于水和乙醇、具有较强的生物可利用度, 以及很强的抗氧化性和抗菌性等特点, 因此被广泛用作天然抗氧化剂^[9]。除此之外苹果多酚还在食品保鲜方面有所应用, 已有研究表明, 苹果多酚可显著提高壳聚糖复合膜的抗氧化活性^[10]; 苹果多酚在与明胶复合时表现出较好的抗氧化性能, 这归因于苹果多酚的多羟基结构, 酚羟基通过产生质子来清除自由基从而达到抗氧化效果; 苹果多酚是一种天然、无毒的交联剂, 与明胶交联后复合膜性能良好^[11]。

随着人们对食品安全的关注度日渐提高, 开发可生物降解、无毒无污染的食品包装材料已成为目前研究的重点课题。壳聚糖、明胶以及苹果多酚均为天然可降解物质, 成分安全, 对人体和环境无危害, 壳聚糖是优良的成膜基材, 但单一成分的壳聚糖薄膜存在质脆、易碎等缺陷, 通过添加明胶可有效增强复合膜的力学性能和成膜性, 再加入苹果多酚作为交联剂以加强各成分间的结合。在上述思路下, 文中主要研究壳聚糖、明胶以及苹果多酚对复合薄膜性能的影响, 从而为绿色食品包装提供性能参考和技术支撑。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要原料: 壳聚糖 (脱乙酰度 $\geq 95\%$, 黏度为 100 ~ 200 mPa·s)、明胶 (99% 生物技术级)、苹果多酚 (分析纯)、醋酸。

主要仪器: 磁力搅拌器; 真空干燥箱; 螺旋测微器; 游标卡尺; CMT 4204 万能力学试验机, 深圳市新三思材料检测有限公司; Nicolet iS10 傅里叶红外

光谱仪, 美国尼高力公司; XRD Ultima IV X 射线衍射仪, 日本理学 (Rigaku); JSM-7600F 场发射扫描电子显微镜, 日本电子株式会社。

1.2 方法

1.2.1 复合膜的制备

壳聚糖溶液的配制: 称取 0.77 g 壳聚糖粉末, 加入到 77 mL 体积分数为 0.5% 的醋酸水溶液中, 在水浴温度为 70 °C 的水浴锅中, 用磁力搅拌机以适当速度搅拌 1 h 至壳聚糖完全溶解, 静置 1 h 待溶液中气泡消失, 得到质量分数为 1% 的壳聚糖溶液。

明胶溶液的配制: 称取 0.35 g 明胶固体, 加入到 35 mL 的蒸馏水中, 在水浴温度为 60 °C 的水浴锅中, 用磁力搅拌器以一定速度搅拌 1 h 直至完全溶解, 静置 1 h 待气泡消失, 得到质量分数为 1% 的明胶水溶液。

苹果多酚溶液的配制: 称取 0.38、0.76、1.14、1.52 g 苹果多酚粉末, 分别加入到 38 mL 蒸馏水中, 在水浴温度为 45 °C 的水浴锅中, 用磁力搅拌器以一定速度搅拌直至完全溶解, 静置 1 h 待气泡消失, 得到质量分数分别为 1%、2%、3%、4% 的苹果多酚水溶液。

壳聚糖薄膜的制备: 将配制好的 77 mL 壳聚糖溶液加入 73 mL 蒸馏水, 在磁力搅拌器中搅拌 30 min, 使溶液充分混合, 静置 1 h 消泡后倒入 4 个直径为 9 cm 的培养皿中, 静置消泡后置于 70 °C 烘干箱中干燥 12 h, 揭膜后在室温 25 °C 下置于干燥器中备用。

复合膜的制备: 将配制好的壳聚糖溶液、明胶溶液分别与质量分数为 0%、1%、2%、3%、4% 的苹果多酚溶液混合, 在磁力搅拌器中搅拌 30 min, 使溶液充分混合, 静置 1 h 消泡后得到 5 个苹果多酚浓度梯度的混合液各 150 mL, 将每个梯度的混合液平均倒在 4 个直径为 9 cm 的培养皿中, 静置消泡后置于 70 °C 烘干箱中干燥 12 h, 揭膜后在室温 25 °C 下置于干燥器中备用。

1.2.2 土埋法测降解性

采用土埋法测定复合膜的降解性, 实验地点选择在阴暗处的草地, 土壤略潮湿。将标记好的 6 组样品置于烘干箱内烘干 5 h, 将样品分别按照土埋深度 0、5、10 cm 依次埋入草地土壤中, 并设置 3 个平行实验, 每隔 7 d 观察一次样品降解情况。

1.3 表征及测试

1.3.1 SEM 表征

采用 JSM-7600F 场发射扫描电子显微镜, 将薄膜剪成适当大小, 粘在导电胶上进行喷金处理, 扫描电压为 10 kV, 观测复合膜的表面形貌。

1.3.2 FT-IR 光谱表征

采用 Nicolet iS10 傅里叶红外光谱仪进行复合膜的红外

外分析,将薄膜裁切成小块,扫描范围为 $500\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$,得到各个官能团的吸收峰。

1.3.3 XRD 测试

扫描范围为 $5^{\circ}\sim 60^{\circ}$,扫描速度为 $5(^{\circ})/\text{min}$,用X射线衍射仪测试样品的衍射峰。

1.3.4 复合膜的力学性能测试

按照 GB/T 1040.2—2006^[12],使用 CMT4204 型万能力学试验机进行复合膜的拉伸性能测试实验。将复合膜样品裁剪成 $5\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 的试样,并测试样品的厚度,设定拉伸速度为 0.5 mm/s ,测定薄膜的拉伸强度和断裂伸长率。

2 结果与分析

2.1 降解性分析

将复合膜土埋 7、14、21 d 后分别掘出观察,土埋 7 d 时掘出发现复合膜出现严重分裂碎解;土埋 14 d 后掘出观察到薄膜裂解程度约为 7 d 前的 2 倍;土埋 21 d 后掘出已经只能观察到若干细小的薄膜碎片。土埋后的薄膜难以重新拾起,原因是薄膜吸收土壤中的水分后表面出现褶皱,强度下降,在土壤微生物和土壤动物的运动作用下薄膜裂解,加速薄膜的降解过程,且土埋深度越深,降解程度越高,表明复合膜的降解性良好。

2.2 SEM 分析

食品包装膜的力学性能在很大程度上取决于大分子在成膜时薄膜形态的均匀性、分子间作用力以及分子在成膜液中的溶解性等,而这些大分子在成膜时所表现出的一些特性,主要与大分子在成膜时所形成的微观结构有关^[13]。通过扫描电镜可以直观地观察到薄膜的表面微观形态。如图 1 所示,由 SEM 图可知,纯壳聚糖、明胶薄膜表面虽有少量杂质,但没有明显的褶皱和气泡,总体较为光滑,表明二者的成膜效果好;加入苹果多酚后制得壳聚糖/明胶/苹果多酚复合膜,复合膜中 3 种物质均匀分散,表面相对光滑,没有明显的褶皱、气泡和凸起,表明 CS、GE 以及 AP 分子之间具有良好的相容性。

2.3 FT-IR 分析

红外光谱是研究氢键和各成分相容性一种非常有效的工具,通过观察红外光谱图可以分析氢键作用的强度以及确定氢键的归属^[14]。为确定壳聚糖、明胶、苹果多酚的官能团,以及各成分分子间的相互作用力和存在形式,对纯壳聚糖薄膜、纯明胶薄膜、苹果多酚粉末以及复合膜进行了红外测试。壳聚糖、明胶、苹果多酚及复合膜的红外光谱图见图 2,在纯壳聚糖薄膜红外光谱图上, $3\,357.52\text{ cm}^{-1}$ 处的宽峰来源于羟基和氨基的伸缩振动, $2\,867.60\text{ cm}^{-1}$ 处是 C—H 的震动吸收峰,在 $1\,592.25\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,417.38\text{ cm}^{-1}$ 处出现的吸收峰源于 CS 酰胺基的伸缩振动, $1\,026$ 、 $1\,059\text{ cm}^{-1}$ 处出现的特征峰是糖类化合物的特征结构;在纯明胶薄膜的红外光谱图上, $3\,291.60\text{ cm}^{-1}$ 处出现的宽峰是酰胺 A 带的特征峰, $2\,933.83\text{ cm}^{-1}$ 处对应的是 C—H 的伸缩振动峰,在 $1\,632.65$ 、 $1\,538.65$ 以及 $1\,450.47\text{ cm}^{-1}$ 处的峰分别源于 C=O 的伸缩振动、N—H 的弯曲振动以及 C—N 的伸缩振动, $1\,235.62\text{ cm}^{-1}$ 处对应酰胺 V 谱带(C—N—C 振动峰或 C—O 伸缩振动峰);在苹果多酚粉末的红外光谱图上,在 $3\,299.27\text{ cm}^{-1}$ 附近出现的宽峰对应羟基的伸缩振动, $2\,930.46\text{ cm}^{-1}$ 处是 C—H 的伸缩振动峰;将壳聚糖、明胶、苹果多酚复合成膜后,在复合膜的红外光谱图上没有发现额外新峰,但是与单膜相比,复合膜的特征峰几乎都向低波段偏移,说明 CS/GE/AP 之间形成了氢键,复合膜内部具有较强的氢键作用,表明各成分之间有较好的相容性^[15]。

为确定苹果多酚与其他 2 种成分之间的作用以及苹果多酚含量变化而产生的影响,对苹果多酚含量不同的复合膜进行红外测试,如图 3 所示,随着 AP 浓度的增加, $3\,290\text{ cm}^{-1}$ 附近的宽峰变得更长, $1\,016\text{ cm}^{-1}$ 处的弯曲振动峰强度变大,说明 3 种分子间的相互作用导致分子间氢键增加,形成了强烈的相互作用; 933 cm^{-1} 和 816 cm^{-1} 处逐渐出现一个新峰,原因可能是在加热干燥的过程中 AP 分子上的苯环与 CS、GE 发生了苯环的二取代反应; $1\,065\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰强度减弱,变得不那么明显,表明由于 3 种物质的结合作用,醇羟基的弯曲振动减少。

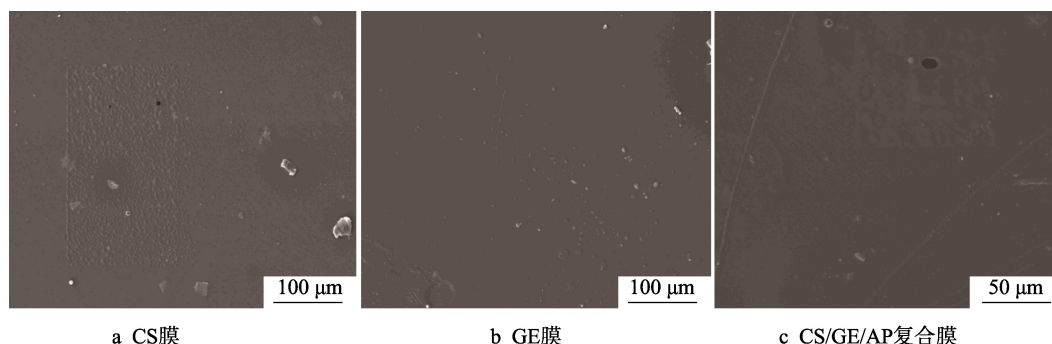


图 1 SEM 图
Fig.1 SEM images

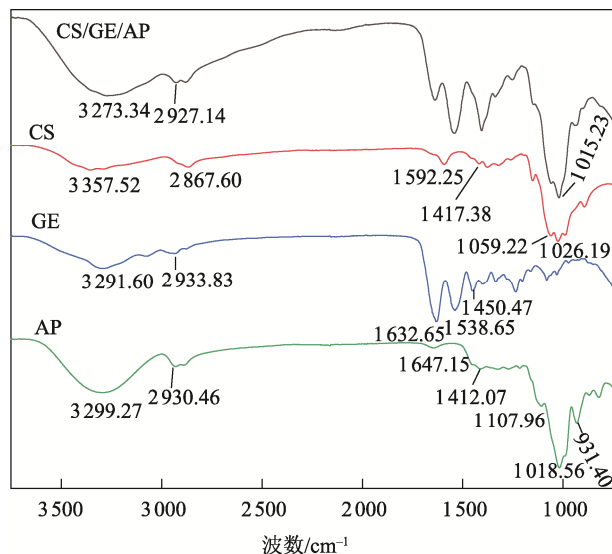


图2 壳聚糖、明胶、苹果多酚及其复合膜的红外光谱图
Fig.2 FI-TR spectra of chitosan, gelatin, apple polyphenols and their composite film

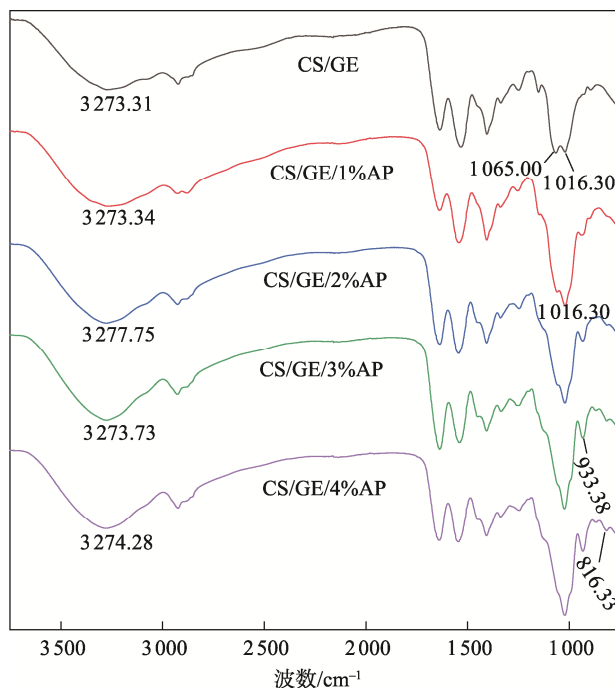


图3 复合膜随苹果多酚含量变化的红外光谱图
Fig.3 FI-TR spectra of the composite film varying with apple polyphenol content

2.4 XRD 分析

X 射线衍射分析是通过对材料进行 X 射线衍射, 分析其衍射图谱, 获得材料的成分、内部原子或分子的结构形态等信息的研究方法, 通过分析 XRD 谱图可以得知共混物各组分之间的相容性^[16]。图 4 给出了 CS、GE、AP、CS/GE 复合膜, 以及 CS/GE/AP 复合

膜的 XRD 测试结果, 在图 4 中, CS 在 $2\theta=20^\circ$ 处有强烈的吸收峰, 这是壳聚糖的不定形结构, 游离羟基和氨基的特征峰; 纯 GE 膜的衍射峰在 $2\theta=21.4^\circ$ 处; AP 在 $2\theta=18.2^\circ$ 处有明显的吸收特征峰; CS/GE 复合膜在 20.7° 处存在一个吸收峰, 与 CS 相比, 特征峰向角度值较大方向移动, 峰强度减弱, 原因可能是分子间的作用力影响或者干扰了 CS 分子链的晶格排列, 破坏了 CS 晶格的有序性^[17]; CS/GE/AP 复合膜的特征峰出现在 $2\theta=20.5^\circ$ 处, 与 CS/GE 复合膜相比, 没有出现新的峰, 特征峰的位置几乎没有发生偏移, 说明 AP 的加入并没有对 CS 及 GE 分子产生影响或产生的影响很小, 分子间作用力不足以影响 CS 和 GE 分子本身的结构排列。

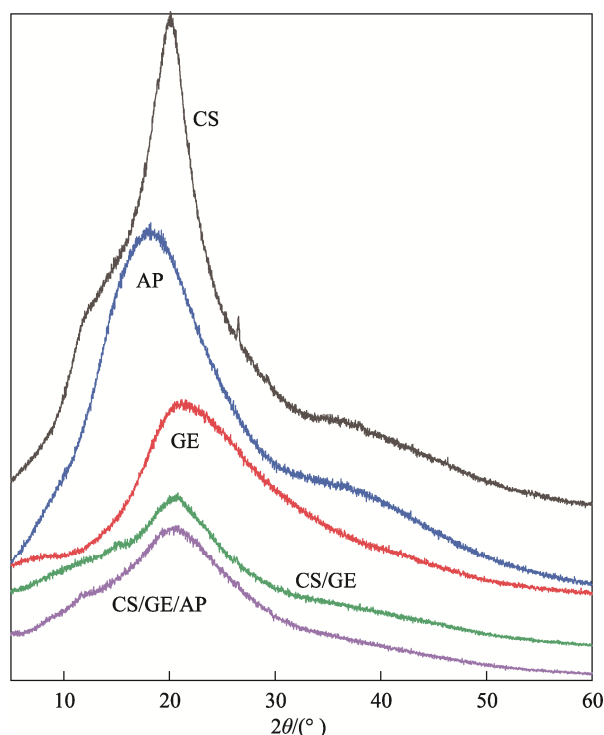


图4 CS、GE、AP 和 CS/GE/AP 的 XRD 谱图
Fig.4 XRD profiles of CS, GE, AP and CS/GE/AP

2.5 复合膜的力学性能分析

拉伸强度和断裂伸长率是表征材料力学性能的重要指标^[18]。相同条件下壳聚糖单膜的拉伸强度为 13.07 MPa, 断裂伸长率为 39.03%, 图 5 是对各组样品取平均值得到的复合膜拉伸强度和断裂伸长率随苹果多酚添加量的变化曲线。不添加苹果多酚时, 壳聚糖/明胶复合膜的拉伸强度为 22.93 MPa, 断裂伸长率为 10.42%; 苹果多酚质量分数为 1% 时, 复合膜的拉伸强度达到最大, 为 27.64 MPa, 断裂伸长率为 3.88%; 苹果多酚质量分数为 3% 时, 复合膜的拉伸强度达到最低值, 为 7.68 MPa, 断裂伸长率为 13.56%。经数据对比可知, 壳聚糖单膜的力学性能较差, 加入

明胶后复合膜的拉伸强度有所提高,苹果多酚可以有效提高复合膜的柔韧性,但过量的苹果多酚会导致复合膜的力学强度下降。随着苹果多酚添加量的增大,复合膜的拉伸强度先增大再减小,拉伸强度增大的原因可能是因为苹果多酚属于一种多羟基的化合物,可以与壳聚糖、明胶大分子之间通过一系列氢键的相互作用构成致密的网络结构,从而增强复合膜的拉伸强度,当苹果多酚含量过高时,其在体系内的分散均匀性较低,可能形成局部应力集中,从而使得复合膜的拉伸强度降低^[19];断裂伸长率先降低再升高,当苹果多酚添加量在2%以内时复合膜断裂伸长率变化缓慢,随着苹果多酚添加量增加,断裂伸长率提高,原因可能是酚类物质可与明胶等蛋白质类化合物发生相互作用或反应,从而增强复合膜的柔韧性^[20]。

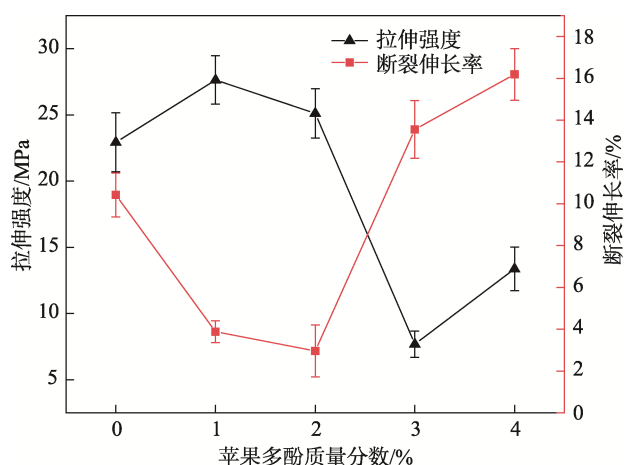


图5 苹果多酚质量分数对复合膜力学性能的影响

Fig.5 Effects of apple polyphenols added on mechanical properties of the composite film

3 结语

实验以苹果多酚添加含量为变量,研究了壳聚糖/明胶/苹果多酚复合膜的力学性能、相容性以及可降解性随苹果多酚含量的变化而产生的影响,得出以下结论。

1) 经土埋法证明复合膜自然降解性良好,可在自然条件下生物降解。

2) 通过红外光谱、扫描电镜和X射线衍射分析,从微观结构证明复合膜中的3种成分——壳聚糖、明胶和苹果多酚之间有较强的相互作用及较好的相容性。

3) 随着苹果多酚添加量的增加,壳聚糖/明胶/苹果多酚复合膜的拉伸强度先增大后减小,当苹果多酚质量分数为1%时拉伸强度达到最大。

壳聚糖、明胶、苹果多酚3种材料复合可制得可生物降解、具有较好力学强度的复合薄膜,该复合薄

膜有望在食品包装领域取得较好的应用。

参考文献:

- [1] 赵益华,贾凯悦,季民,等.壳聚糖改性硅藻土除藻性能及生态安全性评价[J].生态环境学报,2020,29(12):2441-2448.
ZHAO Yi-hua, JIA Kai-yue, JI Min, et al. Algae Removal Performance and Ecological Safety Evaluation of Diatomite Modified by Chitosan[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(12): 2441-2448.
- [2] WANG Q, TANG Y, KE Q, et al. Magnetic Lanthanum-Doped Hydroxyapatite/Chitosan Scaffolds with Endogenous Stem Cell-Recruiting and Immunomodulatory Properties for Bone Regeneration[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2020, 8(24): 5280-5292.
- [3] HAGHIGHI H, LICCIARDELLO F, FAVA P, et al. Recent Advances on Chitosan-Based Films for Sustainable Food Packaging Applications[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 26:
- [4] 李泽民,何生林,丁云桥,等.五因素混水平正交实验优化鱼鳞胶原提取工艺[J].山东化工,2019,48(20):18-22.
LI Ze-min, HE Sheng-lin, DING Yun-qiao, et al. Optimization of Collagen Extraction from Fish Scale by Five-Factor Mixed Horizontal Orthogonal Experiments[J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(20): 18-22.
- [5] YANG Zhi, CHAIEB S, HEMAR Y. Gelatin-Based Nanocomposites: A Review[J]. Polymer Reviews, 2021, 61(4): 765-813.
- [6] MUHAMMAD R, MUHAMMAD B. Importance of Gelatin, Nanoparticles and their Interactions in the Formulation of Biodegradable Composite Films: a Review[J]. Polymer Bulletin, 2020, 78: 4047-4073.
- [7] HOSSEINI S, REZAEI M, ZANDI M, et al. Preparation and Functional Properties of Fish Gelatin-Chitosan Blend Edible Films[J]. Food Chemistry, 2013, 136(3/4): 1490-1495.
- [8] ELZBIETA B, RYSZARD A. Diet and Health: Apple Polyphenols as Antioxidants[J]. Food Reviews International, 2008, 24(2): 235-251.
- [9] 李旋,毕金峰,刘璇,等.苹果多酚的组成和功能特性研究现状与展望[J].中国食品学报,2020,20(11):328-340.
LI Xuan, BI Jin-feng, LIU Xuan, et al. Research Status and Prospect on the Composition and Functional Characteristics of Apple Polyphenols[J]. Journal of Chinese

- Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(11): 328-340.
- [10] LÓPEZ-FERNÁNDEZ O, BOHRER B M, MUNEKATA P E S, et al. Improving Oxidative Stability of Foods with Apple-Derived Polyphenols[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(1): 296-320.
- [11] LIN De-rong, XIAO Li-juan, WEN You, et al. Comparison of Apple Polyphenol-Gelatin Binary Complex and Apple Polyphenol-Gelatin-Pectin Ternary Complex: Antioxidant and Structural Characterization[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021(4): 111740.
- [12] GB/T 1040.2—2006, 塑料拉伸性能的测定[S]. GB/T 1040.2—2006, Determination of Tensile Properties of Plastics[S].
- [13] 王丽媛, 李红艳, 刘天红, 等. 明胶-壳聚糖可食膜的制备及性能表征[J]. *保鲜与加工*, 2016, 16(5): 10-16. WANG Li-yuan, LI Hong-yan, LIU Tian-hong, et al. Preparation and Performance Characterization of Gelatin-Chitosan Edible Films[J]. *Storage and Process*, 2016, 16(5): 10-16.
- [14] WANG D, SUN Z, SUN J, et al. Preparation and Characterization of Polylactic Acid Nanofiber Films Loading Perilla Essential Oil for Antibacterial Packaging of Chilled Chicken[J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 192: 379-388.
- [15] LIU Y, XU C, LIU H, et al. Phase Analysis of PZT 52/48 thin Films by Synchrotron XRD[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2001, 20(10): 933-935.
- [16] 孙理, 李亦欣, 纪祥月, 等. 花青素-明胶/聚乙烯醇-淀粉复合膜制备与表征[J]. *包装工程*, 2021, 42(23): 109-115. SUN Li, LI Yi-xin, JI Xiang-yue, et al. Preparation and Characterization of Anthocyanin-Gelatin/Polyvinyl-Alcohol-Atarch Bilayer Composite Film[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(23): 109-115.
- [17] MARANGONI J, RODRIGUES P, DA S, et al. Sustainable Packaging Films Composed of Sodium Alginate and Hydrolyzed Collagen: Preparation and Characterization[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2021, 14(12): 2336-2346.
- [18] LIU Kai, WU Jun-qiao. Mechanical Properties of Two-Dimensional Materials and Heterostructures[J]. *Journal of Materials Research*, 2016, 31(7): 832-844.
- [19] 朱桂兰, 郭娜, 马文艺, 等. 结冷胶-茶多酚复合膜性能的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(14): 72-77. ZHU Gui-lan, GUO Na, MA Wen-yi, et al. Properties of Gellan Gum-Tea Polyphenols Compounded Films[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(14): 72-77.
- [20] 胡熠, 周伟, 唐艳, 等. 香豆素对鱼鳞明胶可食性膜结构及性能的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(12): 112-118. HU Yi, ZHOU Wei, TANG Yan, et al. Effect of Coumarin on Structure and Properties of Fish Scale Gelatin Edible Film[J]. *Food Science*, 2018, 39(12): 112-118.

责任编辑: 曾钰婵