

芒果核淀粉基膜的性能分析

李旭, 汤继东, 李甘霖

(西华大学 食品与生物工程学院, 四川 610039)

摘要: **目的** 制备以芒果核淀粉为基质的淀粉膜, 分析淀粉膜性能, 为生物可降解包装材料的应用提供一定的理论指导和数据参考。**方法** 制备不同甘油、羧甲基纤维素和没食子酸浓度的淀粉膜, 利用现代分析仪器分析膜的力学性能、水蒸气透过系数、抗氧化活性及热稳定性, 并探究膜的最佳性能参数。

结果 当甘油质量分数为 30%、羧甲基纤维素质量分数为 45%、没食子酸质量分数为 4% 时, 膜的抗拉伸强度为 25.28 MPa, 断裂伸长率为 11.66%, 水蒸气透过系数为 $0.14 \text{ g}\cdot\text{mm}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{kPa})$, 抗氧化活性为 75.93%。**结论** 芒果核淀粉能与添加的助剂形成有效交联, 一定程度上增强了淀粉膜的力学性能和抗氧化活性, 降低了水蒸气透过系数, 并提高了膜的热稳定性。

关键词: 芒果核淀粉; 甘油; 羧甲基纤维素; 没食子酸; 淀粉膜

中图分类号: TS206.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)05-0016-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.05.003

Performance Analysis of the Base Film of Mango Kernel Starch Film

LI Xu, TANG Ji-dong, LI Gan-lin

(College of Food and Biological Engineering, Xihua University, Sichuan 610039, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare starch film based on mango kernel starch, analyze the film property and provide theoretical guidance and data reference for the application of biodegradable packaging materials. Starch films were prepared with different concentrations of glycerol, carboxymethyl cellulose and gallic acid. The mechanical properties, water vapor transmission coefficient, antioxidant activity and thermal stability of the films were analyzed by modern analytical instruments, and the optimal performance parameters of the films were explored. When the mass fraction of glycerol was 30%, carboxymethyl cellulose was 45% and gallic acid was 4%, the tensile strength, elongation at break, water vapor transmission coefficient and antioxidant activity of the film were 25.28 MPa, 11.66%, $0.14 \text{ g}\cdot\text{mm}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{kPa})$ and 75.93%, respectively. Mango kernel starch can form effective cross-link with additives, which can improve the mechanical property and antioxidant activity of the starch films, reduce the water vapor transmittance coefficient and improve the thermostability of the films.

KEY WORDS: mango kernel starch; glycerol; carboxymethyl cellulose; gallic acid; starch film

难以降解的塑料包装材料在给人们日常生活带来极大便利的同时, 也给环境带来了难以修复的损伤。随着人民环保意识的提高和国家对环境保护的高度重视, 降解度高、环境友好的易降解膜和涂层的研

究与应用备受关注, 在可降解膜和涂料研究领域, 玉米淀粉膜、豌豆淀粉膜、木薯淀粉膜等复合膜或涂膜均有一定的理论研究与应用, 一定程度上能够替代难降解的塑料包装材料。

收稿日期: 2021-06-09

基金项目: 四川省应用基础重点项目 (2018JY0045)

作者简介: 李旭 (1982—), 男, 硕士, 西华大学讲师, 主要研究方向为食品质量与安全。

我国作为全球芒果主要生产国之一，加工后残留的大量果皮、果仁等副产品通常不能被合理利用^[1-2]。芒果核仁对人体具有促进肠道消化、消炎杀菌等保健养生功效，还被用于中药材入药^[1,3]。芒果核中，碳水化合物可以达到果核干基的30%到75%左右^[4]，主要成分是淀粉。已有研究发现芒果核淀粉相较于玉米淀粉具有更好的膨胀力和溶解性，以及形成优良淀粉膜的基础^[4]。若将淀粉改性，芒果核淀粉的平滑结构使得芒果核淀粉比玉米淀粉更不易被水解或降解^[5]。芒果核淀粉还具有较高比例的B1型支链淀粉和较高的结晶度^[5]，使其具有较高的热稳定性和结构稳定性，以及较高的可利用价值。

Nawab等^[6]将芒果核淀粉制成热封袋，研究其对红辣椒粉的保藏能力。Silva等^[7]以芒果核淀粉分别与淀粉纳米晶体和纤维素纳米晶体为原料制备出生物纳米复合膜。Sarifuddin等^[8]将牛至精华加入芒果核淀粉膜中而制备出抑菌复合膜。Melo等^[9]将芒果核中的淀粉与核中的脂肪、酚类物质结合制备出具有抗氧化作用的芒果核淀粉复合膜。国内针对以芒果核淀粉为成膜基质的复合膜的研究较少，聂红梅等^[10]对芒果核淀粉提取的理化性质进行了探究，Guo等^[11]研究芒果核淀粉的结构和功能特性，并与其他淀粉材料比较。

没食子酸是一类多酚类物质，具有较好的抗氧化能力和清除自由基的能力，在生物与医药中有广泛应用。此实验采用甘油、羧甲基纤维素作为增塑剂，没食子酸作为抗氧化剂制作淀粉膜。对膜的力学性能、水蒸气透过系数、抗氧化活性和热稳定性进行分析，探究膜的最佳性能参数。

1 实验

1.1 原料与试剂

主要原料：芒果，广西南宁青芒；甘油，分析纯，四川西陇化工有限公司；羧甲基纤维素普通型，食品级，河南万邦化工科技有限公司；没食子酸，食品级，河北谷知味生物科技有限公司；2,2-二苯基-1-吡啶基胍基（DPPH），分析纯，福州飞净生物科技有限公司。

1.2 主要仪器及设备

主要仪器：LHS-150SC型恒温恒湿箱，上海一恒科技有限公司；CTA-20HPRO型质构仪，天津创兴电子设备制造股份有限公司；UV-800T型紫外分光光度仪，上海元析仪器有限公司；IS5型傅里叶红外光谱仪，苏州英蒨特仪器科技有限公司；DTG-60型差式热重同步分析仪，日本岛津公司；螺旋测微仪器，得力集团有限公司。

1.3 方法

1.3.1 芒果核淀粉提取

参照 Nawab 等^[12]的方法从新鲜芒果中取出芒果核仁，清洗切片，按料液比1:3将核仁与质量分数为0.5%亚硫酸氢钠溶液混合后打浆。浆液置于4℃下浸泡24h后，先后通过160目、300目分筛，过筛液静置24h，去除上清液，沉淀物浸入蒸馏水中洗涤沉淀，3000 r/min下离心10 min再次获得沉淀，重复洗涤和离心3次，将收集的淀粉沉淀45℃干燥5h后粉碎，即获得淀粉成品。

1.3.2 淀粉膜的制备

向芒果核淀粉中加入甘油和没食子酸，用20 mL蒸馏水溶解，羧甲基纤维素充分溶解在100 mL蒸馏水中。将淀粉溶解液和羧甲基纤维素溶解液混合，90℃下磁力搅拌30 min，使淀粉充分糊化，去除气泡，获得膜液。将膜液浇铸于15 cm×15 cm的有机玻璃板（丙烯酸板）上，自然流延。冷却后，40℃干燥5 h，脱去玻璃板，将膜置于温度为25℃、相对湿度为50%的恒温恒湿箱中平衡24 h。淀粉膜的组成含量见表1。

1.3.3 力学性能测定

使用质构仪测量膜的抗拉伸强度和断裂伸长率。测定方法参考GB/T 1040.3—2006《塑料拉伸性能的测定》（有所修改）^[13]。测量夹距为80 mm，膜宽度为20 mm，拉伸速率为0.5 mm/s，测量前用螺旋测微仪记录膜厚度，厚度精确到0.001 mm，每组测量5次，结果值取平均数。抗拉伸强度和断裂伸长率的计算公式为：

$$T_s = \frac{F}{D \times d}$$

式中： T_s 为抗拉伸强度（MPa）； F 为拉伸断裂负荷的最大值（N）； D 为薄膜宽度（mm）； d 为薄膜厚度（mm）。

$$E = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中： E 为断裂伸长率（%）； L_0 为测量夹距（mm）； L 为试样断裂后的长度（mm）。

1.3.4 水蒸气透过系数测定

水蒸气透过系数测定方法参考GB/T 1037—1988《塑料薄膜和片材透水蒸气性试验方法》（有所修改）^[14]，将无水CaCl₂平铺在直径5 cm称量瓶中，CaCl₂表面距离杯口4 mm。膜平铺于杯口，边缘用密封蜡密封。置于温度为25℃，相对湿度为50%的恒温恒湿箱中，记录称量瓶48 h内质量稳定后的质量差，每组测量3次。测量前用螺旋测微仪记录膜厚度，精确到0.001 mm。水蒸气透过系数的计算公式为：

表 1 各组芒果核淀粉膜的组分含量
Tab.1 Component contents of mango kernel starch film in each group

组别	芒果核淀粉含量/g	甘油质量分数/%	羧甲基纤维素质量分数/%	没食子酸质量分数/%
第 1 组	4	30	45	4
	4	45	45	4
	4	60	45	4
	4	75	45	4
第 2 组	4	30	15	4
	4	30	30	4
	4	30	45	4
	4	30	60	4
第 3 组	4	30	45	0
	4	30	45	4
	4	30	45	8
	4	30	45	12

$$WVP = \frac{\Delta m \times d}{A \times \Delta t \times \Delta p}$$

式中: WVP 为水蒸气透过系数 ($\text{g}\cdot\text{mm}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{kPa})$); d 为膜的厚度 (mm); Δp 为膜两侧饱和水蒸气压差 (kPa); Δt 为时间间隔 (h); Δm 为质量差 (g); A 为膜的面积 (m^2)。

1.3.5 抗氧化活性测定

使用 1, 1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)评估膜的抗氧化性能。用无水乙醇配制 50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的 DPPH 溶液, 棕色瓶中避光保存。称量 50 mg 薄膜样品, 在 10 mL 蒸馏水中溶解 3 h, 再加入 10 mL 无水乙醇, 溶解液在 3000 r/min 下离心 10 min。移取 1000 μL 上清液, 加入 5 mL DPPH 溶液, 室温避光反应 30 min, 获得 DPPH 处理后的样品液。另取 1000 μL 上清液, 加入 5 mL 无水乙醇, 获得无 DPPH 处理样品液。移取 0.5 mL 蒸馏水、0.5 mL 无水乙醇, 加入 5 mL DPPH 溶液作空白组, 用分光光度仪在 517 nm 处测定样品液和空白组的吸光值。抗氧化活性计算为:

$$A = \left(1 - \frac{A_s - A_j}{A_0} \right) \times 100\%$$

式中: A 为抗氧化活性(%); A_s 为样品液被 DPPH 处理后的吸光值; A_j 为未被 DPPH 处理的样品液的吸光值; A_0 为空白组的吸光值。

1.3.6 红外光谱分析

使用傅里叶红外光谱仪 ATR(衰减全反射)法获得样品的红外光谱图, 将样品用压杆压在硒化锌晶体附件上。测定波数为 400~4000 cm^{-1} , 分辨率为 4 cm^{-1} , 扫描次数为 16。

1.3.7 热稳定性分析

通过 DTG-60 型差热热重同步分析仪对样品进行热失重分析。称取 5~10 mg 膜样品装入 20 μL 铝坩埚。分析温度范围为 30~500 $^{\circ}\text{C}$, 升温速率为 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 在流速为 50 mL/min 的 N_2 吹送下测量, 获得样品热重变化图 (TG) 以及热重变化速率图 (DTG)。

1.3.8 数据处理

采用 SPSS 26 对实验数据进行分析处理, 用 OriginPro 9.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 膜的性能分析

2.1.1 甘油对膜性能的影响

甘油含量对膜力学性能的影响见图 1。随着甘油含量的增加, 膜的抗拉伸强度逐渐降低, 断裂伸长率逐渐增加。甘油质量分数为 30% 的淀粉膜拥有最佳力学性能。淀粉中支链和直链结构可通过氢键结合形成结晶胶束区^[15], 膜制备过程中, 淀粉在高温剪切力作用下糊化, 结晶区转变为无定形区, 此时甘油能够充分与淀粉接触^[16]。随着甘油含量增加, 甘油的羟基与淀粉链的羟基之间形成更多氢键, 使淀粉分子间氢键减少, 降低了淀粉分子间的束缚力, 因此抗拉伸强度降低。同时淀粉分子间束缚力降低, 使得淀粉分子链移动性增强, 形成了更多的自由空间^[17-18], 膜的柔韧性得到增强, 因而断裂伸长率增大。

甘油含量对膜水蒸气透过系数和抗氧化活性的影响结果见图 2。随着甘油含量的增加, 水蒸气透过

系数逐渐增大,甘油质量分数为 30%时,膜具有最较低的水蒸气透过系数。这是由于随着甘油含量增加,膜单位体积中具有亲水性的羟基越多,外加自由空间的影响,使得水分子更容易吸附在膜表面并进入内部^[19]。随着甘油含量的增加,膜的抗氧化活性无明显变化。

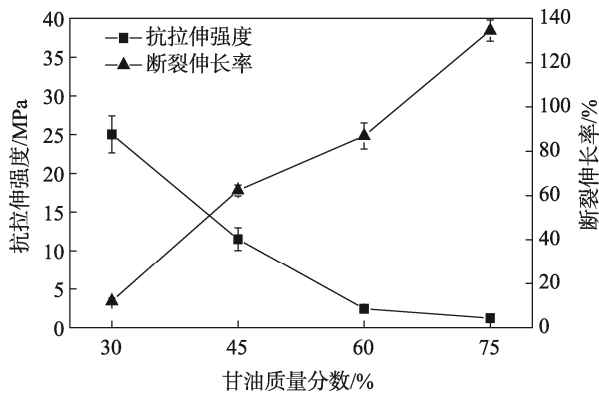
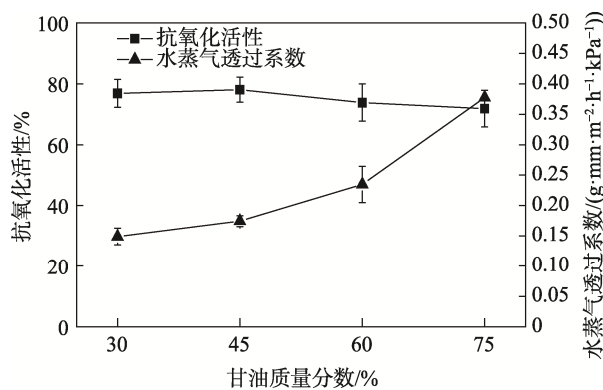


图 1 甘油对力学性能的影响

Fig.1 Effect of glycerol on mechanical properties and water vapor transmission coefficient

图 2 甘油对抗氧化活性和水蒸气透过系数的影响
Fig.2 Effect of glycerol on antioxidant activity

2.1.2 羧甲基纤维素对膜性能的影响

羧甲基纤维素含量对膜力学性能的影响见图 3。膜的抗拉伸强度随羧甲基纤维素含量增加而增大,断裂伸长率随羧甲基纤维素增加而降低。这是由于膜在干燥阶段,羧甲基纤维素自身的羟基和羧基与淀粉的羟基交联形成了氢键和酯键^[20-21],使膜形成了更加致密的结构。当羧甲基纤维素质量分数为 60%时,膜虽具有最高的抗拉伸强度,但断裂伸长率低,膜的脆性较强且易破裂。当羧甲基纤维素质量分数为 45%时,膜的抗拉伸强度值和断裂伸长率大小适中,具有较好的韧性。

羧甲基纤维素含量对膜水蒸气透过系数和抗氧化活性影响见图 4。羧甲基纤维素质量分数为 45%时,水蒸气透过系数最小。当羧甲基纤维素含量继续增大时,水蒸气透过系数反而增大。这是因为高浓度的羧甲基纤维素在混合液中不能够被均匀分散,多余的羧

甲基纤维素分子间形成氢键而发生絮积,使膜结构不再均匀,单位体积内致密效果降低^[19,22]。随着羧甲基纤维素含量不断增高,膜的抗氧化活性略微降低,这可能是由于膜形成的致密结构阻碍了没食子酸与自由基的结合。

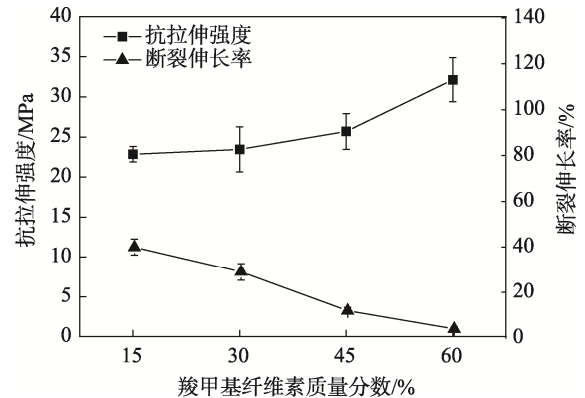


图 3 羧甲基纤维素对力学性能的影响

Fig.3 Effect of carboxymethyl cellulose on mechanical properties

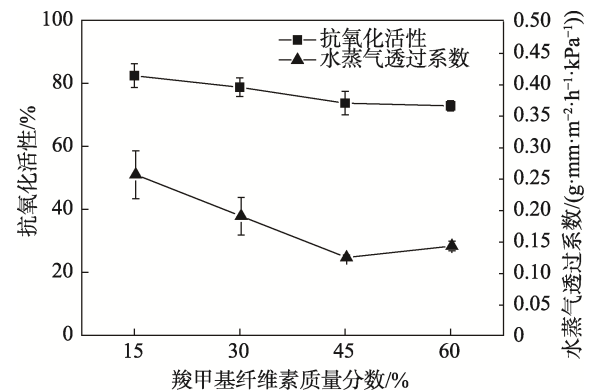


图 4 羧甲基纤维素对抗氧化活性和水蒸气透过系数的影响

Fig.4 Effect of carboxymethyl cellulose on antioxidant activity and water vapor transmittance coefficient

2.1.3 没食子酸对膜性能的影响

没食子酸含量对膜力学性能的影响见图 5。膜的抗拉伸强度随没食子酸的含量增加而无明显变化。随着没食子酸含量的增加,膜的断裂伸率先增大后减小,在没食子酸质量分数为 8%时断裂伸长率达到最大值,这可能由于没食子酸与羧甲基纤维素之间形成分子间氢键加强了膜的相互交联;当没食子酸含量进一步增大,膜的断裂伸长率反而降低,这可能是过多的没食子酸分散在膜中使膜内部产生裂纹所致^[23]。

没食子酸对膜水蒸气透过系数和抗氧化活性的影响见图 6。当没食子酸质量分数为 4%时,水蒸气透过系数与未添加时相当,但当其质量分数超过 4%时,水蒸气透过系数略有增大。这是由于没食子酸引入更多亲水性羟基,从而提高了膜对水的亲和能

力^[24]。未添加没食子酸的淀粉膜也具有较高清除自由基的能力。这是因为糊化干燥后的淀粉具有一定抗氧化能力^[25]，另一方面，提取的淀粉中带有少量来自芒果核中的酚类抗氧化物质^[4]。随着没食子酸含量的增大，淀粉膜抗氧化活性增加。当没食子酸的质量分数超过4%时，淀粉膜的抗氧化活性无明显变化，这是因为溶解后的淀粉膜中，仍有部分没食子酸被包裹在膜内部，无法与DPPH接触反应^[26]。

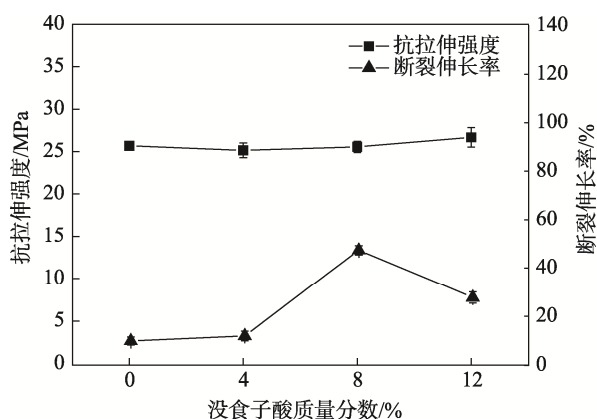


图5 没食子酸含量对力学性能的影响

Fig.5 Effect of gallic acid content on mechanical properties

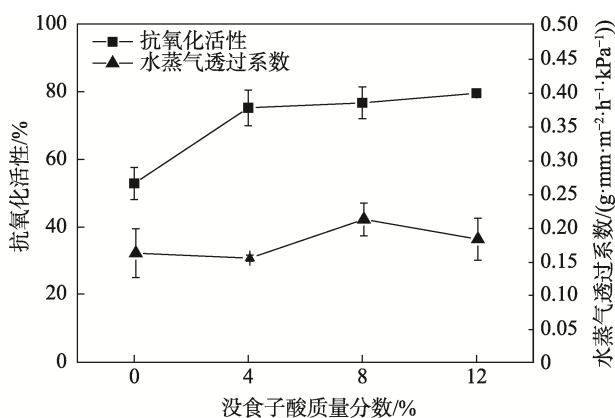


图6 没食子酸含量对抗氧化活性和水蒸气透过系数的影响

Fig.6 Effect of gallic acid content on antioxidation activity and water vapor transmittance coefficient

2.2 最优配比膜与纯淀粉膜的性能比较

综上所述，以4g芒果核淀粉为膜基质，在甘油质量分数为30%、羧甲基纤维素质量分数为45%、没食子酸质量分数为4%时，制备的淀粉膜具有较好的综合测定结果。将该配比下的膜视为最优配比膜，并与纯淀粉膜的力学性能、红外光谱和热稳定性进行对比，结果见表2。由表2可知，助剂的添加极显著地增大了膜的抗拉伸强度和断裂伸长率，显著地提高了膜的抗氧化活性，并降低了膜的水蒸气透过系数，膜的各项试验指标均得到优化。

2.3 膜的红外光谱分析

最优配比膜和纯淀粉膜的红外光谱见图7。3272 cm⁻¹为O—H伸缩振动；2925 cm⁻¹为C—H伸缩振动；1645 cm⁻¹为H₂O弯曲振动；1337 cm⁻¹为C—H弯曲振动；1150~931 cm⁻¹为羧甲基纤维素和淀粉中糖苷键C—O—C相关的C—O伸缩振动^[7]。其中最优配比膜在1598 cm⁻¹出现了芳环的C=C伸缩振动^[9,27]，这归因于添加了没食子酸。与纯淀粉膜相比，最优配比膜的3272 cm⁻¹的O—H和1150~931 cm⁻¹的C—O吸收峰分别发生明显减弱和部分偏移，这是因为羧甲基纤维素、没食子酸能与膜中淀粉-甘油体系发生氢键相互作用^[28]。

2.4 膜的热稳定性分析

最优配比膜和纯淀粉膜的TG曲线和DTG曲线分别见图8和图9。从TG曲线可以看出，膜均表现出2段明显的质量损失。对于纯淀粉膜，第1段出现在50~150℃，该阶段主要是膜中水分的蒸发；第2段出现在280~350℃，该阶段是膜中淀粉的碳化。对于最优配比膜，第1段出现在50~240℃，该阶段主要为膜中水分蒸发和甘油分解，第2段出现在250~330℃，该阶段主要为淀粉碳化、羧甲基纤维素和没食子酸的分解^[29]。从DTG曲线上得知，助剂的添加减缓了膜中水分的蒸发以及淀粉的碳化，这是因为助剂与糊化淀粉良好的相互作用力，形成更加致密的结构，说明助剂提高了膜的热稳定性。

表2 最优配比膜与纯淀粉膜相关性能比较

Tab.2 Comparison of the correlation properties between the optimal ratio film and the pure starch film

指标	抗拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	水蒸气透过系数/(g·mm·m ⁻² ·h ⁻¹ ·kPa ⁻¹)	抗氧化活性/%
纯淀粉膜	19.35 ^{±0.39}	2.12 ^{±0.67}	0.20 ^{±0.02}	63.80 ^{±4.00}
最优配比膜	25.28 ^{±0.28}	11.66 ^{±0.46}	0.14 ^{±0.01}	75.93 ^{±1.29}
差异显著性	**	**	*	*

注：**表示最优配比膜与纯淀粉膜相关试验指标差异极显著 ($P < 0.01$)，*表示最优配比膜与纯淀粉膜相关试验指标差异显著 ($P < 0.05$)

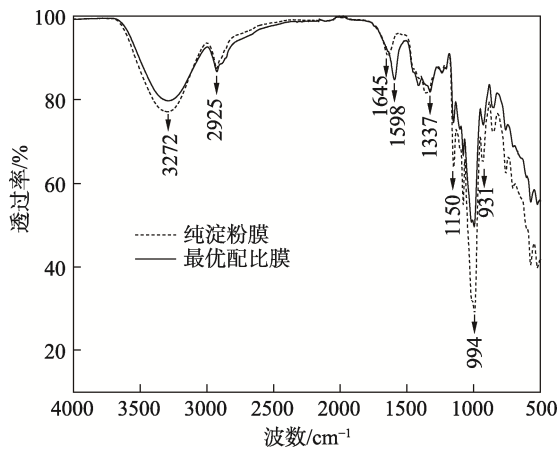


图 7 膜的红外光谱

Fig.7 Infrared spectrum of membrane

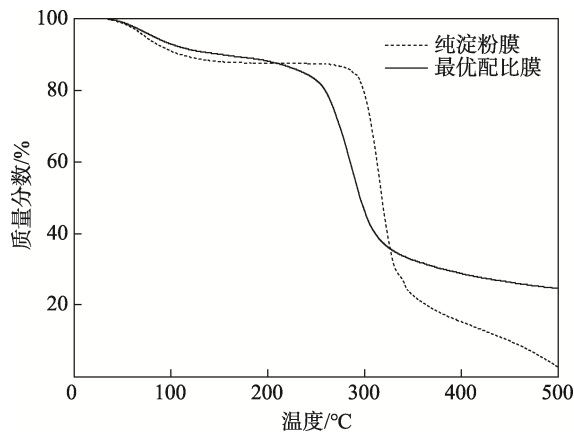


图 8 膜的热重曲线

Fig.8 Thermogravimetric curve of membrane

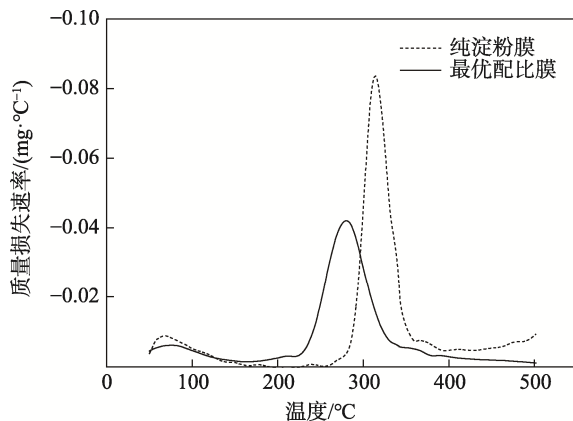


图 9 膜的质量损失速率曲线

Fig.9 Mass loss rate curve of membrane

3 结语

文中研究旨在探究一种以芒果核淀粉为基质的可降解膜，添加甘油、羧甲基纤维素和没食子酸，探究其对膜性能的影响。通过单因素实验，得到芒果核

淀粉膜的最优配比：以 4 g 芒果核淀粉为膜基质，甘油质量分数为 30%、羧甲基纤维素质量分数为 45%、没食子酸质量分数为 4%。其抗拉伸强度为 25.28 MPa，断裂伸长率为 11.66%，水蒸气透过率为 0.14 g·mm/(m²·h·kPa)，抗氧化活性为 75.93%。通过与纯淀粉膜比较，膜的综合性能明显改善；通过红外光谱分析和热稳定分析，证明膜中各组分之间具有相互交联作用，形成了更加致密的结构，助剂的添加也在一定程度上增强了膜的热稳定性。综上分析，利用芒果核淀粉作为成膜基质具有可行性，这为基于芒果核淀粉制备生物可降解包装材料，并为应用于易氧化食品包装提供一定的理论指导和数据参考。

参考文献：

- [1] 刘凤仪, 周佳欣, 金铭, 等. 芒果生产过程中副产物的综合利用研究进展[J]. 食品工业, 2018, 39(11): 263-265.
LIU Feng-yi, ZHOU Jia-xin, JIN Ming, et al. Comprehensive Utilization of By-Products in Mango Production[J]. The Food Industry, 2018, 39(11): 263-265.
- [2] 胡会刚, 赵巧丽, 林丽静, 等. 凯特芒加工副产物多糖提取工艺[J]. 广东农业科学, 2016, 43(12): 80-84.
HU Hui-gang, ZHAO Qiao-li, LIN Li-jing, et al. Extraction Technology of Polysaccharides from Kaite Mango By-Products[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2016, 43(12): 80-84.
- [3] KAUR J, RATHINAM X, KASI M, et al. Preliminary Investigation on the Antibacterial Activity of Mango(Mangifera Indica L: Anacardiaceae)Seed Kernel[J]. Asian Pacific Journal of Tropical Medicine, 2010, 3(9): 707-710.
- [4] MWAURAH P W, KUMAR S, KUMAR N, et al. Physicochemical Characteristics, Bioactive Compounds and Industrial Applications of Mango Kernel and Its Products: A Review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(5): 2421-2446.
- [5] BANGAR S P, KUMAR M, WHITESIDE W S. Mango Seed Starch: A Sustainable and Eco-Friendly Alternative to Increasing Industrial Requirements[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183: 1807-1817.
- [6] NAWAB A, ALAM F, HAQ M A, et al. Innovative Edible Packaging from Mango Kernel Starch for the Shelf Life Extension of Red Chili Powder[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 114: 626-631.
- [7] SILVA A P M, OLIVEIRA A V, PONTES S M A, et al. Mango Kernel Starch Films as Affected by Starch Nanocrystals and Cellulose Nanocrystals[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 211: 209-216.

- [8] SARIFUDDIN N, SHAHRIM N A A, AZMAN K S. Effect of Oregano Essential on the Properties of Mango Kernel Starch Films[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 429: 012062.
- [9] MELO P E F, SILVA A P M, MARQUES F P, et al. Antioxidant Films from Mango Kernel Components[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 487-495.
- [10] 聂红梅, 陈瑶琼, 冯丽敏, 等. 芒果核淀粉的制备及理化性质研究[J]. 食品科技, 2017, 42(11): 284-287.
- NIE Hong-mei, CHEN Yao-qiong, FENG Li-min, et al. Preparation and Physical and Chemical Properties of Mango Kernel Starch[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(11): 284-287.
- [11] GUO Ke, LIN Ling-shang, FAN Xiao-xu, et al. Comparison of Structural and Functional Properties of Starches from Five Fruit Kernels[J]. Food Chemistry, 2018, 257: 75-82.
- [12] NAWAB A, ALAM F, HASNAIN A. Mango Kernel Starch as a Novel Edible Coating for Enhancing Shelf-Life of Tomato (*Solanum Lycopersicum*) Fruit[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 103: 581-586.
- [13] GB/T 1040.3—2006, 塑料拉伸性能的测定[S].
GB/T 1040.3—2006, Determination of Tensile Properties of Plastics[S]
- [14] GB/T 1037—1988, 塑料薄膜和片材透水蒸气性试验方法[S].
GB/T 1037—1988, Test Method for Water Vapor Permeability of Plastic Films and Sheets[S].
- [15] 王璋. 食品化学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2006: 67-68.
WANG Zhang. Food Chemistry[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2006: 67-68.
- [16] 潘博, 贾雪, 支朝晖, 等. 复合改性淀粉膜材料工艺优化与性能分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(9): 156-163.
PAN Bo, JIA Xue, ZHI Chao-hui, et al. Process Optimization and Performance Analysis of Composite Modified Starch Films[J]. Modern Food Science & Technology, 2020, 36(9): 156-163.
- [17] 闫倩倩, 孔青, 续飞, 等. 改性淀粉基可食性膜的制备及性能研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(2): 41-46.
YAN Qian-qian, KONG Qing, XU Fei, et al. Preparation and Properties of Edible Films Based on Modified Starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(2): 41-46.
- [18] NORDIN N, OTHMAN S H, RASHID S A, et al. Effects of Glycerol and Thymol on Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Corn Starch Films[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 106: 105884.
- [19] 黄超凡, 陈虎剑, 郑科旺, 等. 可食性淀粉复合膜的制备及性能[J]. 食品科技, 2019, 44(6): 92-96.
- HUANG Chao-fan, CHEN Hu-jian, ZHENG Ke-wang, et al. Preparation and Property of Edible Starch Composite Films[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(6): 92-96.
- [20] TAVARES K M, CAMPOS A D, MITSUYUKI M C, et al. Corn and Cassava Starch with Carboxymethyl Cellulose Films and Its Mechanical and Hydrophobic Properties[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 223: 115055.
- [21] KAUSHIK A, SINGH M, VERMA G. Green Nanocomposites Based on Thermoplastic Starch and steam Exploded Cellulose Nanofibrils from Wheat Straw[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 82(2): 337-345.
- [22] MA Xiao-fei, CHANG P R, YU Jiu-gao. Properties of Biodegradable Thermoplastic Pea Starch/Carboxymethyl Cellulose and Pea Starch/Microcrystalline Cellulose Composites[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 72(3): 369-375.
- [23] SUN Xiu-xiu, WANG Zhe, KADOUH H, et al. The Antimicrobial, Mechanical, Physical and structural Properties of Chitosan-Gallic Acid Films[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 57(1): 83-89.
- [24] ZHAO Yu-jia, SALDANA M D A. Use of Potato by-Products and Gallic Acid for Development of Bioactive Film Packaging by Subcritical Water Technology[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2019, 143: 97-106.
- [25] FERREIRA S, ARAUJO T, SOUZA N, et al. Physicochemical, Morphological and Antioxidant Properties of Spray-Dried Mango Kernel Starch[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2019, 1: 100012.
- [26] PATINO-RODRIGUEZ O, AGAMA-ACEVEDO E, RAMOS-LOPEZ G, et al. Unripe Mango Kernel Starch: Partial Characterization[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105512.
- [27] INDU B, SUKHCHARN S, SAXENA D C. Exploring the Influence of Heat Moisture Treatment on Physicochemical, Pasting, Structural and Morphological Properties of Mango Kernel Starches from INDIAN CULTIVARS[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 110: 197-206.
- [28] LAN Wen-ting, ZHANG Rong, JI Teng-teng, et al. Improving Nisin Production by Encapsulated *Lactococcus Lactis* with Starch/Carboxymethyl Cellulose Edible Films[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 251: 117062.
- [29] TAVARES K M, DE CAMPOS A, LUCHESI B R, et al. Effect of Carboxymethyl Cellulose Concentration on Mechanical and Water Vapor Barrier Properties of Corn Starch Films[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 246: 116521.