

海藻酸钠-低脂果胶-刺槐豆胶三元复合膜的制备及其在香菇压差膨化干燥中的应用

常大伟, 任娜, 曹佳怡, 王虎玄, 孙玉姣, 沈文, Sara Sendi, 支晓红

Preparation of Ternary-component Sodium Alginate- Low-methyl Pectins-Locust Bean Gum Film and Its Application in Explosion Puffing Drying of Shiitake Mushrooms

CHANG Dawei, REN Na, CAO Jiayi, WANG Huxuan, SUN Yujiao, SHEN Wen, Sara Sendi, and ZHI Xiaohong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060082>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同预干燥方式对瞬时压差膨化香菇脆品质特性的影响

Effect of Different Pre-drying Methods on the Quality Attributes of Instant Controlled Pressure Drop Puffing Dried Shiitake (*Lentinus edodes*) Crisps

食品工业科技. 2023, 44(17): 281-287 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110307>

三赞胶-海藻酸钠可食用复合膜的制备及性能

Preparation and Properties of Sanxan/Sodium Alginate Edible Composite Film

食品工业科技. 2021, 42(19): 255-260 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021030219>

多糖纳米材料制备、表征及在果蔬可食性涂膜中应用的研究进展

Research Progress on Preparation, Characterization and Application of Polysaccharide Nanomaterials in Edible Coating of Fruits and Vegetables

食品工业科技. 2021, 42(24): 424-433 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020110068>

羧甲基纤维素钠、海藻酸钠、瓜尔豆胶三元混合膜配比优化及膜性能分析

Optimization of the Ratio of Sodium Carboxymethyl Cellulose, Sodium Alginate and Guar Gum in Ternary Mixed Film and Performance Analysis of the Film

食品工业科技. 2022, 43(21): 262-270 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021120281>

海藻多酚-多糖复合保鲜涂膜对猪肉饼贮藏品质的影响

Effect of Seaweed Polyphenol-Polysaccharide Composite Freshness Coating on the Storage Quality of Pork Patties

食品工业科技. 2025, 46(5): 277-284 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024030029>

可食用膜的简介及其在肉及肉制品中应用的研究进展

Introduction of Edible Film and Its Application in Meat and Meat Products

食品工业科技. 2020, 41(16): 318-325 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.16.051>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

常大伟,任娜,曹佳怡,等.海藻酸钠-低脂果胶-刺槐豆胶三元复合膜的制备及其在香菇压差膨化干燥中的应用[J].食品工业科技,2025,46(11):232-241. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060082

CHANG Dawei, REN Na, CAO Jiayi, et al. Preparation of Ternary-component Sodium Alginate- Low-methyl Pectins-Locust Bean Gum Film and Its Application in Explosion Puffing Drying of Shiitake Mushrooms[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 232-241. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060082

· 包装与机械 ·

海藻酸钠-低脂果胶-刺槐豆胶三元复合膜的制备及其在香菇压差膨化干燥中的应用

常大伟^{1,*}, 任娜¹, 曹佳怡¹, 王虎玄¹, 孙玉姣¹, 沈文¹, Sara Sendi¹, 支晓红²

(1.陕西科技大学食品科学与工程学院,陕西西安 710021;

2.咸阳市食品药品检验检测中心,陕西咸阳 712000)

摘要:本研究以海藻酸钠(SA)、低脂果胶(LMPs)和刺槐豆胶(LBG)为成膜材料,通过优化各组分的质量比,成功制备了一种海藻酸钠-低脂果胶-刺槐豆胶三元复合可食膜(SPL)。系统研究了复合膜液的流变学特性,测量了膜的机械性能(包括抗拉强度和断裂伸长率)、水蒸气透过系数、水溶性、透光率以及水接触角等关键性能指标,利用扫描电镜(SEM)和傅里叶红外光谱(FTIR)技术对复合膜的表面形貌、内部结构及其组分间的相互作用进行表征。此外,本研究还探索了 SPL 三元复合膜涂膜预处理在香菇压差膨化干燥(EPD)工艺中的应用效果。实验结果显示,当 SA、LMPs 和 LBG 的质量比为 50:20:30 时,所制备的 SPL 三元复合膜的综合性能较优,抗拉强度为 13.54±0.95 MPa,断裂伸长率为 58.15%±4.32%,同时在 600 nm 波长下的透光率为 79.70%±2.31%,表现出良好的机械强度和光学性能。复合膜表面平滑,内部结构均匀致密,SA、LMPs 和 LBG 三者之间具有良好的相互作用及分子相容性。与未处理和仅使用 SA 膜液涂膜预处理的 EPD 香菇产品相比,采用 SPL 三元复合膜液结合 Ca²⁺交联涂膜预处理后的 EPD 香菇产品,其产品品质得到了明显提升。

关键词:多糖,可食用膜,香菇,压差膨化干燥,涂膜预处理

中图分类号:TS251.5

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2025)11-0232-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060082

本文网刊:



Preparation of Ternary-component Sodium Alginate- Low-methyl Pectins-Locust Bean Gum Film and Its Application in Explosion Puffing Drying of Shiitake Mushrooms

CHANG Dawei^{1,*}, REN Na¹, CAO Jiayi¹, WANG Huxuan¹, SUN Yujiao¹,
SHEN Wen¹, Sara Sendi¹, ZHI Xiaohong²

(1.College of Food Science and Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China;

2.Xianyang Food and Drug Inspection and Testing Center, Xianyang 712000, China)

Abstract: This study focused on the preparation of a ternary composite edible film using sodium alginate (SA), low-methoxyl pectin (LMP), and locust bean gum (LBG) as film-forming materials. The film, termed sodium alginate-low-methoxyl pectin-locust bean gum (SPL), was optimized by adjusting the mass ratio of the components. The rheological properties of the composite film solution were thoroughly analyzed, and critical performance indicators such as mechanical properties (including tensile strength and elongation at break), water vapor permeability coefficient, water solubility, light transmittance, and water contact angle of the film were measured. Scanning electron microscopy (SEM) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) were utilized to characterize the surface morphology, internal structure, and

收稿日期: 2024-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(32272446);陕西省科技厅重点研发计划项目(2022NY-223);陕西省西安市科技局农业技术研发计划项目(21NYYF0058)。

作者简介/通信作者*: 常大伟(1978-),男,博士,副教授,研究方向:农产品深加工、功能因子的微胶囊化,E-mail:cdw1860@126.com。

intermolecular interactions of the composite film. Additionally, this study explored the application effect of SPL ternary composite film coating pretreatment in the explosion puffing drying (EPD) process of shiitake mushrooms. The experimental results indicated that when the mass ratio of SA, LMPs, and LBG was 50:20:30, the prepared SPL ternary composite film exhibited superior comprehensive properties, with a tensile strength of 13.54 ± 0.95 MPa, an elongation at break of $58.15\% \pm 4.32\%$, and a light transmittance of $79.70\% \pm 2.31\%$ at a wavelength of 600 nm, demonstrating good mechanical strength and optical properties. The surface of the composite film was smooth, with a uniform and dense internal structure, indicating good interactions and molecular compatibility among SA, LMPs, and LBG. Compared to untreated shiitake mushrooms and those pretreated with only SA film, the quality of EPD shiitake mushrooms pretreated with the SPL ternary composite film, combined with Ca^{2+} crosslinking, was significantly enhanced.

Key words: polysaccharides; edible film; shiitake mushrooms; explosion puffing drying; coatings pretreatment

涂膜预处理 (Edible coatings pretreatment, EC) 是一种新兴的非热干燥预处理技术,近年来备受食品科学领域关注。其以大分子物质为主要原料,通过浸渍、喷洒、涂抹等方式在食品原料表面形成一层半透性薄膜,能够有效抑制氧化反应、改善产品颜色和质地,并提高营养物质的保留率^[1]。多糖类涂膜材料因其良好的阻气性、透水性和光泽性,能有效隔绝物料与氧气的接触,而提升产品的色泽并保留有效成分,已被广泛应用于食品干燥前的预处理中^[2-3]。

目前已有研究表明,低脂果胶 (Low-methyl pectins, LMPs)^[4]、海藻酸钠 (Sodium alginate, SA)^[5]、刺槐豆胶 (Locust bean gum, LBG)^[6] 等多糖类涂膜材料在改善干燥过程中的产品品质和提高营养物质保留率方面具有显著效果。Sui 等^[7] 采用 SA 对扇贝肉进行了 EC 处理,显著提高了压差膨化干燥 (Explosion puffing drying, EPD) 扇贝肉的膨化度,降低了硬度和色差,增强了脆度。de Oliveira 等^[4] 采用果胶基可食用涂层作为猕猴桃热风干燥的预处理,研究发现预处理组与未处理的对照组之间的维生素 C 浓度有显著的差异,表明果胶涂膜预处理有助于猕猴桃热风干燥过程中维生素 C 的保持。

然而单一的涂膜材料在成膜过程中往往存在机械强度差、可塑性不佳等问题,限制了其在干燥预处理中的应用^[8-10]。为了解决单一成分可食性膜存在的问题,复合膜的复配及其制备成为人们的研究焦点,通过不同组分间的协同作用,形成紧密的多孔网络结构,从而提高膜的物理性能^[11]。王碧等^[12] 采用溶液共混技术,成功研制了在力学性能和柔韧性方面展现出明显优势的新型葡甘聚糖/海藻酸钠/羧甲基纤维素三元膜。Balasubramanian 等^[13] 制备了卡拉胶/黄原胶/结冷胶的三元水凝胶膜,其在热性能、力学性能以及水蒸气透过率等方面均实现了显著提升。实验室前期研究发现采用 SA、LMPs 和 LBG 进行 EC 预处理的香菇能有效减少 EPD 干燥过程中的品质劣变,改善压差膨化香菇的色泽和质构,是理想的涂膜材料。但对 SA、LMPs 和 LBG 三者复配的研究并未涉及。

基于此,本研究采用溶液共混法,在前期研究的基础上以 SA、LMPs 和 LBG 为主要成膜材料,甘油

为增塑剂,制备了 SA-LMPs-LBG 三元复合膜 (SPL)。通过深入研究膜液混合体系的流变学特性,并对复合膜的物理性能进行了测试与表征,优化了三种多糖的配比。此外,本研究还进一步探讨了复合膜液与 Ca^{2+} 交联对 EPD 香菇脆片品质的影响,旨在为 EC 预处理技术在果蔬干燥领域的应用提供理论与实践支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

香菇 选购于西安当地市场的同一批次,挑选直径为 5 ± 1 cm 的香菇,用蒸馏水洗净沥干去柄后,按照 5 ± 1 mm 厚度切片、备用,新鲜香菇的初始水分含量为 $88.79\% \pm 2.6\%$ (湿基);低脂果胶 (食品级) 西安桃谷食品有限公司;食用甘油 (食品级) 丰益油脂科技 (天津) 有限公司;刺槐豆胶、魔芋胶 (粘度 ≥ 15000 mPa·s)、瓜尔豆胶 (粘度: 5000~5500 EPs, 200 目) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司;海藻酸钠、羧甲基纤维素钠 (粘度: 300~800 mPa·s) 化学纯,国药集团化学试剂有限公司。

EP213 电子分析天平 奥豪斯仪器 (常州) 有限公司; UV-1240 紫外-可见分光光度计 日本 SHIMADZU 公司; 84-1A 磁力搅拌器 上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司; Haake-Mars 60 流变仪 美国 Thermo Fisher Scientific 公司; FEI Q45+EDAX Octane Prime 环境扫描电子显微镜 美国 FEI 公司; UV2900 紫外可见分光光度计 上海舜宇恒平科学仪器有限公司; HR/T20MM 立式高速冷冻离心机 湖北赫西仪器装备有限公司; VECTOR-22 傅里叶红外光谱仪 德国布鲁克 Bruker 公司; DSP20 视频接触角测量仪 德国 KRUSS 公司; CM-5 分光测色仪 柯尼卡美能达 (中国) 投资有限公司; TA. Plus 物性分析仪 英国 Stable Micro System 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 膜液及膜的制备 将 SA、LMPs 和 LBG 分别按一定质量比混合,各种膜液组成如表 1 所示,各膜液的质量分数均为 2%,甘油质量分数为 2%。将 LBG 加入到去离子水中,并在 80 °C 的温度下使用恒温磁力搅拌器搅拌 20 min,搅拌速率为 800 r/min。将 SA 和 LMPs 逐一添加到膜液中,并在 65 °C 下继

表 1 膜液的组成

Table 1 Composition of film solutions

样品编号	聚合物含量(%)		
	海藻酸钠	低脂果胶	刺槐豆胶
SA	100	0	0
LMPs	0	100	0
LBG	0	0	100
SP	50	50	0
SL	50	0	50
SPL1	50	40	10
SPL2	50	30	20
SPL3	50	25	25
SPL4	50	20	30
SPL5	50	10	40

注:SA表示纯海藻酸钠膜,LMPs表示纯低脂果胶膜,LBG表示刺槐豆胶膜,SP表示海藻酸钠/低脂果胶二元复合膜,SL表示海藻酸钠/刺槐豆胶二元复合膜,SPL表示海藻酸钠-低脂果胶-刺槐豆胶三元复合膜。

续搅拌 3 h,直至完全溶解。在搅拌过程中用聚乙烯醇保鲜膜将烧杯口严密封闭,以防止水分蒸发和外界杂质的侵入。当膜液混合均匀后,加入甘油并充分搅拌均匀。将处理好的膜液放置在真空干燥箱中,在 0.1 MPa 的真空度下进行脱气处理、备用。

将复合膜液倒入 90 mm 培养皿内,使其高度为 0.5 cm,于 35 ℃ 的烘箱进行烘干 12 h,冷却揭膜,将膜放置在干燥皿中备用。

1.2.2 流变特性的测定 25 ℃ 下,取 1 mL 复合膜液置于流变仪的上下平板之间(直径 40 mm、间隙 1 mm)样品台上,使其分布均匀,进行振荡频率扫描振动,测定温度为 25 ℃,在 0.1~100 s⁻¹ 剪切速率下测量粘弹性特性。运用幂律方程(Power law)对溶液的静态流变曲线进行了拟合处理,获取样品的稠度系数、流动指数以及决定系数(R²)。具体的拟合方程如公式(1)所示^[8]。

$$\tau(\text{Pa}) = k \times \dot{\gamma}^n \quad \text{式 (1)}$$

式中: τ 为剪切应力, Pa; k 为稠度系数, Pa·s; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s⁻¹; n 为流动指数。

对不同质量比下的复合膜液,扫描的频率范围设定为 0.6283~62.83 rad/s(即 0.1~10 Hz),扫描应变为 1%,使其位于线性粘弹区内。采用弹性模量(G')和损耗模量(G'')作为主要评价指标评估复合膜液的动态流变特性。其中,G'主要用于描述物质的固体或弹性特性,而 G''反映了物质的流体或黏性特性。

1.2.3 膜的综合性能测定

1.2.3.1 透光率的测定 选取光滑无瑕疵的膜,裁剪成 10 mm×40 mm 的矩形后贴于比色皿一侧,置于分光光度计中,在 600 nm 波长下测量,以空比色皿做对照,平行测量三次,结果取平均值^[12]。

1.2.3.2 水分含量及水溶性的测定 为测定膜的水分含量和水溶性,切取 10 mm×10 mm 的膜样品,记录初始质量,并在 105 ℃ 烘箱中干燥后重新称重。再将干燥样品浸入含有 15 mL 蒸馏水的离心管中,

振荡 3 h,离心后移除溶液并再次干燥,得到不溶物质量。每个样品平行测试三次,取平均值。根据公式(2)和(3)计算每个薄膜样品的水分含量和水溶性^[14]。

$$\text{WC}(\%) = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

$$\text{WS}(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

式中: WC 是膜的水分含量, %; WS 是膜的水溶性, %; W₀ 是膜的初始质量, g; W₁ 是膜的绝干质量, g; W₂ 是膜溶解后的质量, g。

1.2.3.3 厚度的测定 采用游标卡尺对膜进行测量,在膜的中心以及四边选取五个不同位置进行厚度测定,计算平均值,用 mm 表示^[14]。

1.2.3.4 水蒸气透过率的测定 采用拟杯子法测定水蒸气透过率,将膜裁剪成适当大小并紧密封装于装有 3 g 无水氯化钙的 50 mL 广口瓶瓶口,随后置于含饱和氯化钾溶液的真空干燥器中,维持 24 h。每个样品平行测试三次,取平均值。计算公式如式(4)所示^[15]。

$$\text{WVP}(\text{g} \cdot \text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})) = \Delta m \times \frac{d}{A \times t \times \Delta P} \quad \text{式 (4)}$$

式中: WVP 是膜的透水系数, g·mm/(m²·h·kPa); Δm 是稳定的质量增量, g; d 是膜的厚度, mm; A 是有效测定面积, m²; t 是测量时间间隔, h; ΔP 是试样两侧的水蒸气压差, kPa。

1.2.3.5 机械性能的测定 膜的拉伸性能和断裂伸长率使用物性分析仪测定:将膜样品切成矩形条(长×宽: 6 cm×1 cm),初始间隙和测试速度分别设定为 20 mm 和 10 mm/min,每个样品膜平行测定三次,结果取平均值。膜的机械性能计算公式如(5)和(6)所示^[10]。

$$\text{TS}(\text{MPa}) = \frac{F}{L \times M} \quad \text{式 (5)}$$

$$\text{EB}(\%) = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100 \quad \text{式 (6)}$$

式中: TS 是抗拉强度, MPa; F 是膜断裂时所受的最大张力, N; L 是膜的厚度, mm; M 是膜的宽度, mm; EB 是断裂伸长率, %; L_1 是膜破裂期间的伸长长度, mm; L_0 是膜的原始长度, mm。

1.2.4 水接触角的测定 采用接触角测量仪测定膜的表面接触角。将膜按 30 mm×10 mm 的尺寸裁剪,并使用双面胶将其固定在清洁的载玻片上。在 25 ℃ 下,通过微量注射器以 5 $\mu\text{L/s}$ 的速度将 10 μL 的超纯水滴在膜的表面。在溶胀开始前,迅速拍摄记录下接触角的数据^[13]。

1.2.5 膜的微观形态观察 将干燥后的膜进行喷金,对复合膜的表面及横截面进行观察,复合膜处于高真空状态,加速电压为 5~10 kV^[10]。

1.2.6 傅里叶红外光谱表征 取一片复合膜样品,进

行红外光谱扫描。采集条件为: 25 ℃ 下, 以 4 cm^{-1} 分辨率, 在 $500\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ 波数范围内, 扫描 32 次^[12]。

1.2.7 涂膜预处理及热风-压差膨化干燥 EC 预处理: 将切好的香菇片分成 5 组, 每组 50 g, 其中 2 组按照 1:5 的料液比 (w/w) 完全浸没在配制好的 SPL4 复合膜液中, 另 2 组浸入装有质量分数 2% 的 SA 膜液中。10 min 后将香菇取出, 用干净的滤纸拭去表面多余的溶液。分别从 SA 膜液和 SPL 复合膜液中各取出 1 组, 分别记为 SAo 和 SPLo, 将其置于不锈钢筛上, 于室温下放置 30 min, 使涂膜样品表面的涂层固化。剩余 2 组香菇浸入 2% 的 CaCl_2 溶液中浸泡 30 min 时间, 后将香菇从 CaCl_2 溶液中取出、沥干后, 用吸水纸擦干表面水分备用, 记为 SA-Ca 和 SPL-Ca。最后 1 组香菇未进行任何预处理, 作为对照组, 记为 CK。

热风-压差膨化干燥 (Hot air-Explosion puffing drying, HA-EPD): 将预处理后的香菇在 50 ℃ 的热风干燥箱中预干燥至水分含量 30% (湿基) 以下, 随后将预干燥后的香菇转移至自封袋中, 放置于 4 ℃ 冰箱中均湿 12 h。均湿后的香菇片放置于压差膨化设备的膨化罐中, EPD 条件为: 膨化温度为 90 ℃, 膨化压力差为 0.6 MPa, 停滞时间 12 min, 抽真空温度 60 ℃, 抽真空时间 90 min。

1.2.8 热风-压差膨化香菇脆片品质特性测定

1.2.8.1 色泽的测定 采用 CM-5 分光测色仪进行测定。样品的总体颜色变化用总色差 ΔE 表示, ΔE 值越小说明产品色泽越鲜亮越好。每组样品重复 6 次, 计算公式如公式 (7)^[16]:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad \text{式 (7)}$$

式中: L^* 、 a^* 、 b^* 表示样品的色度值; L_0 、 a_0 、 b_0 表示鲜样的色度值。

1.2.8.2 质构的测定 硬度和脆度采用 TA-XT PLUS 21/50 型物性分析仪进行测定。测定条件: 选择阻力模式; 测试前速度 3.0 mm/s; 测试速度 1.0 mm/s; 测试后 10.0 mm/s; 破裂测试距离 15 mm; 采集数据速率 500 次/s; 探头型号 HDP/CFS。在仪器自动采集的数据中, 硬度值: 用 Force 表示 (g), 数值越大, 硬度越大; 脆度值: 用 Distance 表示 (mm), 数值越小, 脆性越好。测试时选取大小、形状相似的样品, 每组样品重复 5 次^[17]。

1.2.8.3 香菇的微观结构观察 将压差膨化后的香菇脆片断面用导电胶粘在样品台上, 用离子溅射仪喷金处理后, 再利用扫描电子显微镜在放大 1000 倍数下观察拍照。

1.3 数据处理

使用 SPSS 17.0 软件处理和分析数据, 采用 Duncan 检验 ($P < 0.05$) 进行显著性分析。数据以平均值 \pm 标准差表示。使用 Origin 2021 和 GraphPad

Prism 8 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同质量比对 SPL 三元复合膜液流变学性质的影响

成膜溶液的流变特性对液体涂层的延展性、均匀度以及所形成的复合膜的厚度与机械性能均具有显著影响^[18]。根据图 1(a) 所展示的表观粘度与剪切速率的关系曲线, 可以观察到, 在 25 ℃ 条件下, 随着剪切速率的递增, SPL 复合膜液的表观粘度呈现出下降的趋势, 这一特性被称为剪切稀化。在剪切速率处于 $0.1\sim 20\text{ s}^{-1}$ 范围时, 粘度出现了急剧的下降。同时, 复合膜液中 LBG 占比的提高导致了表观粘度的相应增长。这一现象归因于 SA、LMPs 和 LBG 之间通过氢键相互作用, 形成了相互缠绕的致密网络结构^[19-20]。当剪切力增强并破坏这一缠绕网络时, 会产生粒子团簇或液滴聚集, 从而导致表观粘度的降低^[21]。在剪切速率 $0.1\sim 100\text{ s}^{-1}$ 的范围内, 7 种 SPL 复合膜液表观粘度影响大小依次为 $\text{SL} > \text{SPL5} > \text{SPL4} > \text{SPL3} > \text{SPL2} > \text{SPL1} > \text{SP}$, 随着 LBG 比例的增加, 膜液的粘度也相应增大。这是由于 LBG 分子在单位体积内的数量增多, 使得 LBG 与其他成膜基质间的距离缩短, 进而增强了分子间的作用力。

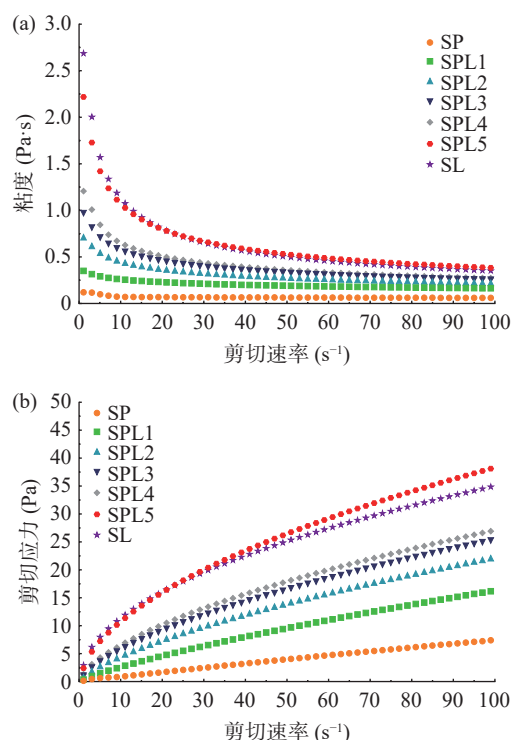


图 1 不同质量比 SPL 复合膜液的静态流变学性质
Fig.1 Static rheological properties of SPL composite film solutions with different mass ratios

注: (a) 膜液粘度与剪切速率曲线图; (b) 膜液剪切应力与剪切速率曲线图。

由不同成膜液的剪切应力与剪切速率的静态流变图 1(b) 可知, 剪切应力与剪切速率之间呈现正相关关系, 并且所有曲线都经过原点并向剪切应力 Y 轴突出。这表明所有的复合膜液均属于非牛顿流

体。幂律方程拟合结果表明(表 2),所有样品的流体指数 n 均小于 1,从而确认了它们的非牛顿假塑性流体特性。 n 值的大小直接体现了复合膜液与牛顿流体的相似度以及粘度受剪切速率影响的程度; n 值较高时,膜液特性更趋近于牛顿流体,其粘度对剪切速率的依赖程度较低;相反, n 值较低则表明膜液的假塑性更为显著^[20]。7 种 SPL 复合膜液中,随着 LBG 比例的增大, k 值逐渐增加, n 值逐渐降低,非牛顿性增强。

表 2 不同质量比 SPL 复合膜液的静态流变学幂律方程拟合参数

Table 2 Fitting parameters of the power law equation for the static rheology of SPL composite film solutions with varying mass ratios

样品名称	稠度系数 k	流体指数 n	R^2
SP	0.1116	0.9133	0.9997
SPL1	0.4400	0.7858	0.9951
SPL2	0.9655	0.6824	0.9876
SPL3	1.3480	0.6390	0.9983
SPL4	1.6370	0.6105	0.9517
SPL5	3.0820	0.5484	0.9373
SL	3.7020	0.4887	0.9996

进一步通过动态频率扫描中的储能模量(G')和损耗模量(G'')来深入评估成膜溶液的动态流变特性(如图 2 所示)。随着扫描频率的递增, G' 和 G'' 均展现出上升的趋势。在交叉点出现之前,损耗模量 G'' 的值高于储能模量 G' ,这表明溶液主要呈现出液态特性,且在此阶段未观察到明显的凝胶现象^[22]。随后 G' 超过 G'' 这标志着溶液中的 SA、LMPs 和 LBG 开始形成紧密的交联网络结构。随着 LBG 在复合膜液中占比的增加,交叉点逐渐向低频区域移动。这一变化表明,SPL 复合膜液分子间的作用力在逐渐增强,从而导致凝胶行为的增强。然而,当 LMPs 的质量占比超过 20% 时,交叉点消失,这意味着凝胶行为变得相对较弱^[23-24]。

2.2 不同成膜材料对膜综合性能的影响

2.2.1 透光率 透光率可作为共混物质相容性的评估指标,若高分子相容性不佳,光在界面散射或反射,导致透光率下降^[25]。从图 3 中可以看出除 SPL3 以外,所有三元复合膜在 600 nm 下的透光率均在 75% 以上,且优于二元复合膜和单一膜,各复合膜之间的透光率差异并不显著($P>0.05$)。这一结果表明,复合比例对膜的透光率影响有限,SA、LMPs 和 LBG 三者之间具有良好的相容性。其中,SPL4(质量比为 50:20:30)的透光率最高,表明在此比例下,膜的透光性最优。

2.2.2 水分含量和水溶性 水分含量和水溶性是评价可食用膜性能的重要指标^[26]。图 4 显示,随着 LBG 占比的增加,SPL 三元复合膜的水分含量呈下降趋势。当 SA、LMPs、LBG 三组分质量比为 50:20:30 和 50:10:40(即 SPL4 和 SPL5)时,SPL 复合

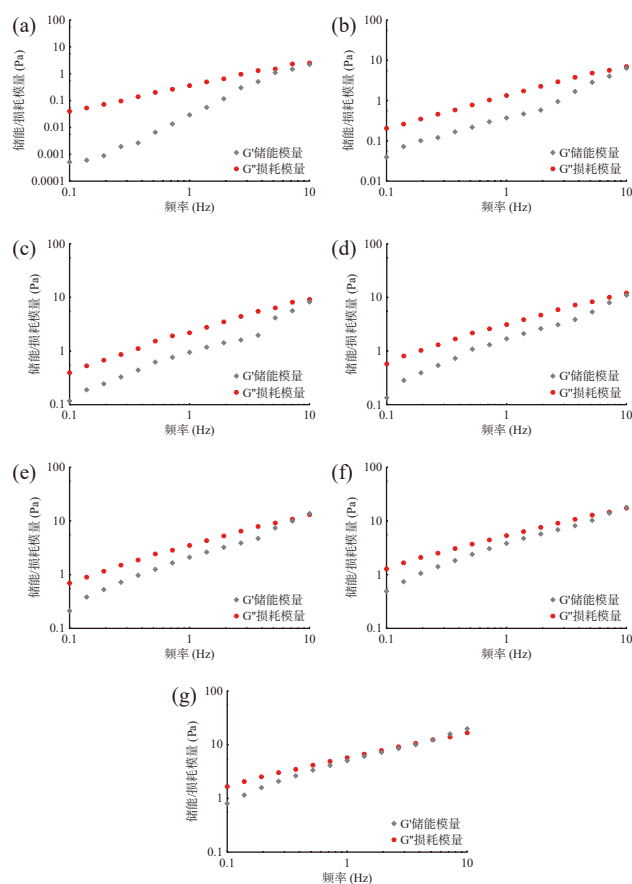


图 2 不同质量比 SPL 复合膜液的储能模量(G')和损耗模量(G'')

Fig.2 Storage modulus (G') and loss modulus (G'') of SPL composite film solutions with different mass ratios

注:(a)SP;(b)SPL1;(c)SPL2;(d)SPL3;(e)SPL4;(f)SPL5;(g)SL。

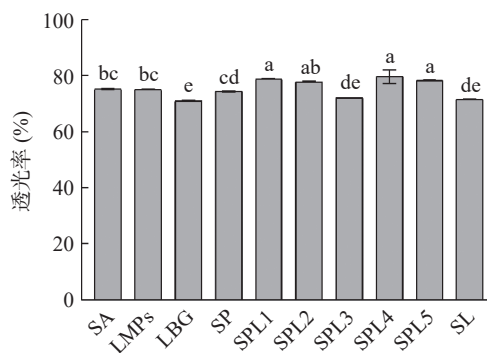


图 3 不同成膜材料对膜透光性的影响

Fig.3 Effect of different film-forming materials on the film translucency

注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),图 4~图 6 同。

膜的水分含量低于单一膜和二元复合膜,这可能是因为该配方下 SA、LMPs 和 LBG 多糖高分子间形成的网状结构更加致密,使得羟基分子与水分子间的连接减少,从而降低了含水量。SPL 三元复合膜在水溶性方面相较于二元复合膜 SP、SL 以及单一膜 SA、LMPs 有着显著的降低($P<0.05$),且随着 LBG 占比的升高,整体呈下降趋势。这可能是因为复配使得 SPL 复合膜中多糖高分子链的自由运动受到限制,使

得膜材的网络结构更加紧密有序,进而增加了 SPL 复合膜的耐水性^[27]。当 SA、LMPs、LBG 三组分质量比为 50:20:30 和 50:10:40(即 SPL4 和 SPL5)时,水溶性达到最低值,分别为 66.35% 和 65.40%,这两个比例下的复合膜与单一膜 LBG 的水溶性(66.46%)相比,并无显著性差异($P>0.05$)。

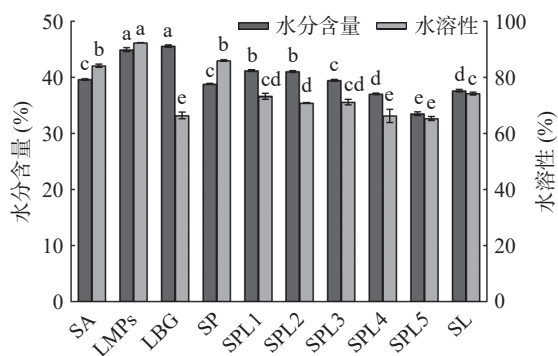


图 4 不同成膜材料对膜水分含量和水溶性的影响

Fig.4 Effects of different film-forming materials on film moisture content and water solubility

2.2.3 水蒸气透过率 水蒸气透过率是膜材料阻隔性能的重要指标,受膜厚度、结构紧密度和结晶度影响^[28]。从图 5 可知,SPL 三元复合膜在厚度方面并无显著性差异($P>0.05$),这表明在试验范围内,SA、LMPs 和 LBG 这三种多糖高分子聚合物能够相互渗透并形成较好的相容性。此外,SPL 三元复合膜均展现出了良好的水蒸气透过率性能,但与单一膜 LBG 相比有着显著的降低($P<0.05$)。复合膜中加入 SA 和 LMPs 后,由于多糖结构中的羟基分子间产生了氢键相互作用,导致膜材形成了相较于单一 LBG 更为紧密的网状结构,造成水蒸气透过率的降低。

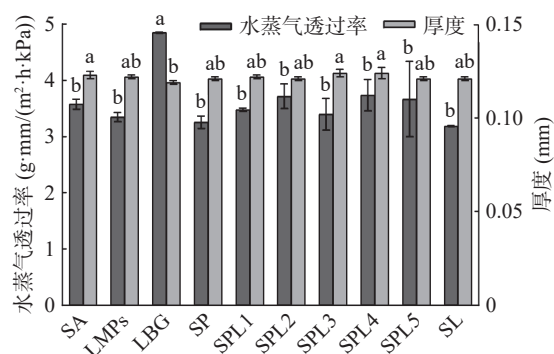


图 5 不同成膜材料对膜水蒸气透过率和厚度的影响

Fig.5 Effect of different film-forming materials on film water vapor transmittance and thickness

2.2.4 力学性能 膜的力学性能反映了分子间的交联与移动性,其中抗拉强度评估膜的抗断裂能力,而断裂伸长率则描述膜在受力时的延展性,反映其柔韧性^[29-30]。如图 6 所示,相较于二元和单一膜,SPL 三元复合膜展现出更佳的力学性能,这说明 SA、LMPs、LBG 三组分复配后,多糖链间的相容性和分

子间作用力更强^[11]。不同质量比的 SPL 三元复合膜的抗拉强度相差不大,但随着 LBG 比例的增加,三元复合膜的断裂伸长率增加,当 SA、LMPs、LBG 三组分为 50:10:40 时,复合膜的断裂伸长率最高,为 $59.67\% \pm 1.39\%$ 。

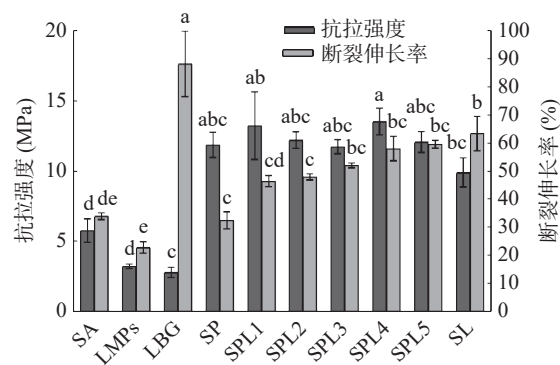


图 6 不同成膜材料对膜力学性能的影响

Fig.6 Effect of different film-forming materials on the mechanical properties of films

综合考虑,当 SA、LMPs、LBG 质量比为 50:20:30 时,复合膜展现出最优的综合性能:抗拉强度达 13.54 ± 0.95 MPa,断裂伸长率为 $58.15\% \pm 4.32\%$,600 nm 波长下透光率为 $79.70\% \pm 2.31\%$,水蒸气透过率为 $3.74 \text{ g} \cdot \text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})$ 。因此,基于以上综合性能分析,选择配方 SPL4 进行后续的试验研究。

2.3 水接触角

接触角(CA)是指在固体、液体和气体三相交界处,固-液界面与气-液界面之间的夹角。通常,当

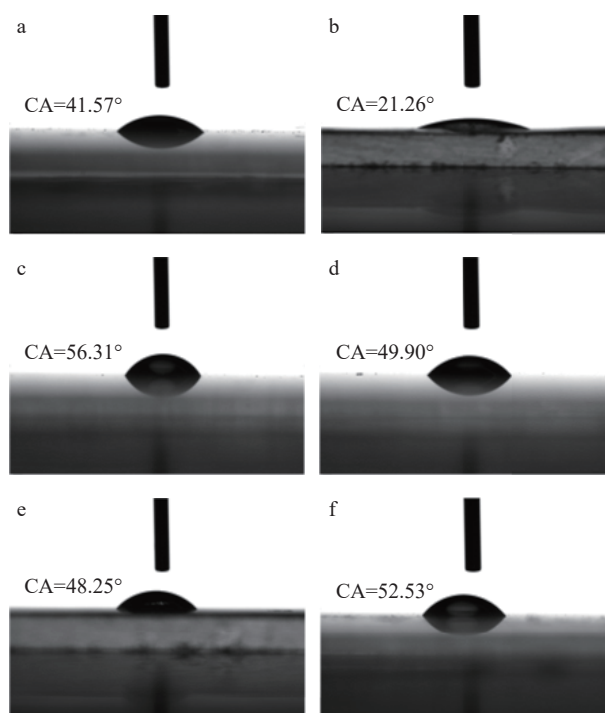


图 7 不同膜的水接触角

Fig.7 Water contact angles of different films

注:(a)SA;(b)LMPs;(c)LBG;(d)SP;(e)SL;(f)SPL4;图 8、图 9 同。

CA 小于 90° 时, 固体表面展现出亲水性, 且 CA 越小, 亲水性能越强^[31]。

图 7 展示了单一膜 SA、LMPs、LBG, 二元复合膜 SP、SL 以及三元复合膜 SPL4 的 CA 结果。观察发现, 所有膜的 CA 均小于 90° , 表明它们均具有亲水性。然而, 相较于单一膜 SA、LMPs 和二元复合膜 SP、SL, 三元复合膜 SPL4 的 CA 有所增大。这主要归因于 SA、LMPs 和 LBG 三组分间的复配效应, 它们通过相互作用形成了更为致密的三维网状结构。这种结构的变化可以从 SEM 图像(图 8 和图 9)中观察到, SPL4 三元复合膜展现出更为紧密的微观结构。这种紧密的结构可能封闭了部分亲水性基团, 导致水分子在膜表面的浸润能力减弱, 进而表现为 SPL4 三元复合膜 CA 的增大。

2.4 微观结构分析

通过 SEM 可以细致观察复合膜材的微观形貌与均匀性, 因为多糖复合膜的性能在很大程度上是由高分子微观结构决定的。对单一膜 SA、LMPs、LBG, 二元复合膜 SP、SL 和三元复合膜 SPL4 的表面和截面形貌采用 SEM 表征, 如图 8 和图 9 所示。

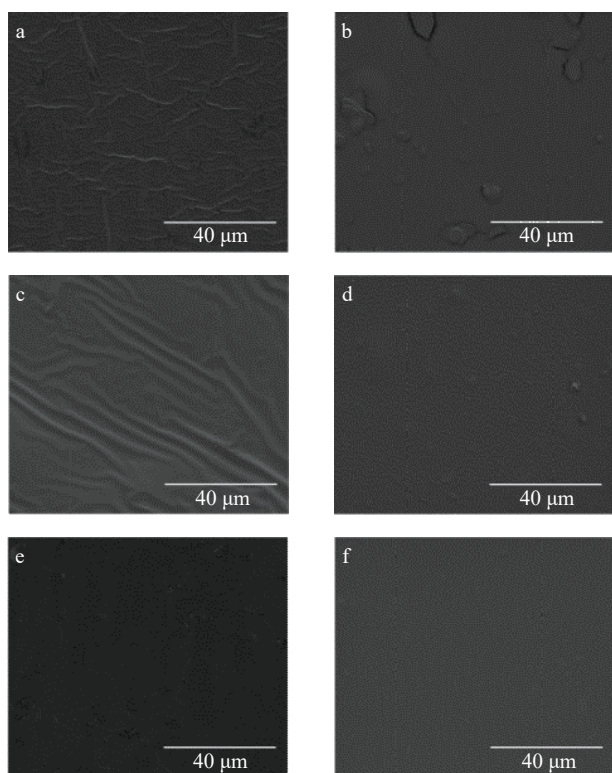


图 8 不同膜平面的微观结构

Fig.8 Microstructure of different film surfaces

由图 8 可以看出, 单一膜 SA 和 LMPs 以及二元复合膜 SP、SL 的表面存在突起的小颗粒, 并且孔隙较大, 单一膜 LMPs 的表面还出现了明显的裂痕。相比之下, 单一膜 LBG 的表面虽然有些褶皱, 但并未出现裂痕或孔洞。而三元复合膜 SPL 的表面均匀、光滑, 既没有裂隙也没有小孔, 更没有明显的相分离现象。进一步观察图 9 中的膜断面形貌, 可

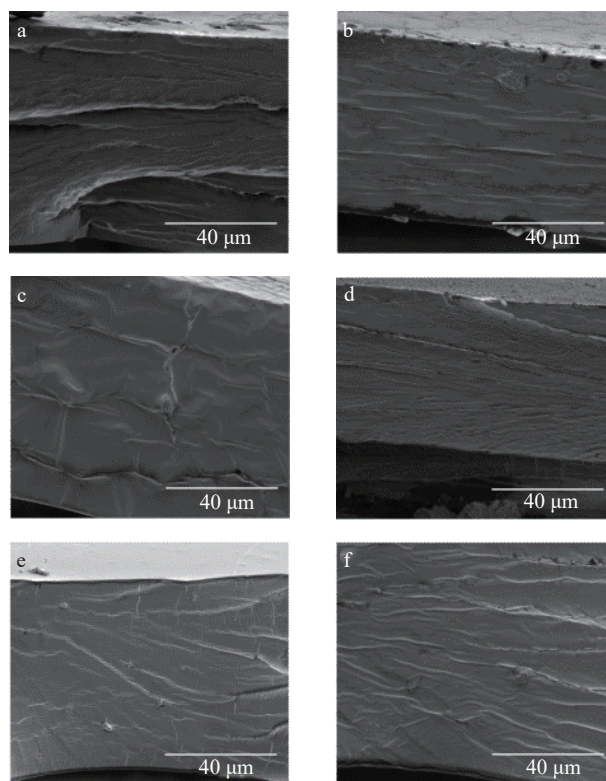


图 9 不同膜截面的微观结构

Fig.9 Microstructure of different film cross-sections

以发现 SPL 膜的断面更加致密紧实, 表明 SA、LMPs 和 LBG 三者之间在复合膜中具有良好的相容性, 形成了紧密的结构。

2.5 FTIR 分析

傅里叶变换红外光谱作为一种有效的分析工具, 可用于探究高分子聚合物之间的相容性和分子间的相互作用^[32]。对单一膜 SA、LMPs、LBG 和以 SPL4 为例的 SPL 三元复合膜结构进行了红外表征, 其红外图谱如图 10 所示。从图中可知, 首先, 作为高分子多糖, SA、LMPs、LBG 结构中均存在大量羟基, SA 在 3248 cm^{-1} 附近, LMPs 在 3275 cm^{-1} 附近, LBG 在 3277 cm^{-1} 附近均出现了由 -OH 伸缩振动引起的宽吸收峰^[33], 在复合膜 SPL4 中, 该峰位移至 3261 cm^{-1} 附近。其次, 2880 cm^{-1} 附近的伸缩振动峰说明膜中存在有 C-H 和 $-\text{CH}_2$ 结构。此外, SA 在

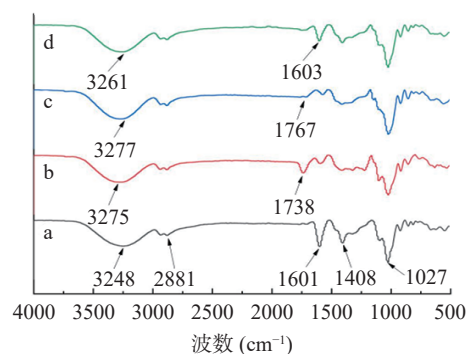


图 10 不同膜的 FTIR 图谱

Fig.10 FTIR spectra of different films

注: (a)SA; (b)LMPs; (c)LBG; (d)SPL4。

1601 cm^{-1} 附近, LMPs 在 1738 cm^{-1} 附近, LBG 在 1767 cm^{-1} 附近的吸收峰对应于羧基的伸缩振动, 经过复合后位移至 1603 cm^{-1} 附近, 进一步证明了分子间相互作用的存在。上述红外光谱的变化说明 SA、LMPs、LBG 在复合膜内发生了显著的相互作用, 涉及氢键、静电作用及范德华力等。这些作用力增强了它们之间的相容性, 并导致了复合膜中羟基、羧基等基团的振动吸收峰出现变化^[34]。

2.6 香菇压差膨化干燥品质分析

SPL 复合膜液以及是否使用 CaCl_2 溶液进行交联对香菇在 HA-EDP 过程中品质的影响, 结果如表 3 所示。与未处理组的香菇相比, 经 EC 处理的香菇表面平整, 有光泽, 香菇膨化效果明显, 中间部分有明显的膨起。从微观结构可以看出 EC 预处理的香菇, 形成了形状规则且均匀的空腔, 说明 EC 预处理有助于膨化形成均匀的组织结构, 同时获得了较优的质构品质。这是由于涂膜材料在香菇表面形成了一层对于气体具有半透性的屏障。因此, 在 EPD 过程中, 物料罐内压力由正压转变为负压之前, 涂膜的存在使得香菇内部的压力均匀分布, 有利于膨化过程的进行。而在膨化的瞬间, 香菇内部的压力差和干燥介质环境迅速从正压降至负压, 涂层与香菇内部得到水分同时发生“闪蒸”现象, 在压差的作用下, 香菇组织发生膨胀^[35]。









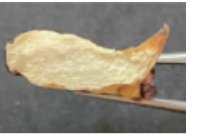

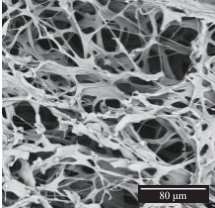
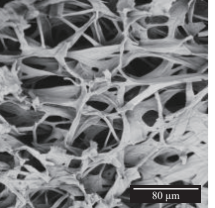
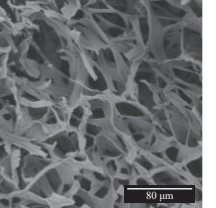
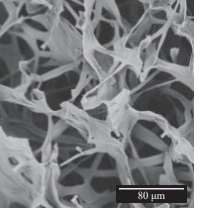
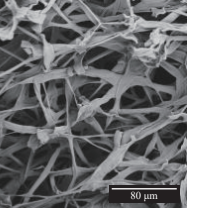
经过 Ca^{2+} 交联处理的香菇在膨化效果更明显, 香菇脆片中部膨起幅度更大。通过观察其微观结构发现, 经过 Ca^{2+} 交联后的香菇 SA-Ca 和 SPL-Ca 相比于未经交联处理的其微观结构中的空腔, 其形状更加规则且均匀。这主要归因于 SA 和 LMPs 与 Ca^{2+}

交联处理后, 在香菇表面形成了一层稳定的交联结构, 使得压差膨化干燥过程中香菇内部的压力分布更为均匀, 从而促进了膨化过程的顺利进行^[36]。在对比 SA 膜液和 SPL 复合膜液对香菇膨化效果的影响时, 发现 SPL 涂膜预处理的香菇膨化效果更为明显, 微观结构中所形成的空腔尺寸更大。这可能是因为 SPL 成膜性好, 这赋予了其良好的屏障功能, 在香菇的表面能形成相比于 SA 更致密均一的膜, 形成的薄膜越致密, 香菇组织内水蒸气形成的压力越高, 增强了膨化香菇过程的驱动力, 使得 SPL 复合膜液在促进香菇膨化方面更具优势^[35]。

硬度方面, 经 EC 处理后的香菇硬度显著降低 ($P<0.05$), 经过 Ca^{2+} 交联处理的压差膨化香菇脆片硬度较高。然而, 相较于 SA 处理组, Ca^{2+} 交联对 SPL 涂膜处理的香菇硬度虽有所增加, 但 SPLo 与 SPL-Ca 之间并无显著性差异 ($P>0.05$), 说明使用 SPL 作为涂膜液 EC 预处理时, 是否使用 Ca^{2+} 对硬度方面的影响较小。在脆度方面, 与未处理的香菇相比, 经 EC 处理后的香菇脆片的脆性显著提高 ($P<0.05$), 且各组之间无显著性差异 ($P>0.05$), 说明不同涂膜材料和是否交联处理对香菇脆度的影响有限。色泽方面, SPL 涂膜处理的香菇其色差最大 ($P<0.05$), SA 涂膜与未处理的香菇之间无显著性差异 ($P>0.05$), 说明 SA 对香菇色泽的保持效果更佳。同时, Ca^{2+} 交联处理后的香菇脆片其色差略微降低, 但无显著性差异 ($P>0.05$), 说明交联处理能够略微保持压差膨化香菇的色泽。综合来看, SPL-Ca 处理组合在提升压差膨化香菇品质方面表现出一定的促进作用。

表 3 不同膜液涂膜预处理对香菇压差膨化干燥品质的影响

Table 3 Effect of pretreatment of different film solutions on the quality of EPD of shiitake mushrooms

指标	CK	SAo	SPLo	SA-Ca	SPL-Ca
外观					
截面					
微观结构					
硬度(g)	902.13±54.00 ^a	501.27±10.44 ^d	556.04±24.05 ^{cd}	661.14±38.50 ^b	589.62±5.47 ^{bc}
脆度(mm)	1.90±0.11 ^a	0.26±0.13 ^b	0.34±0.11 ^b	0.29±0.07 ^b	0.27±0.06 ^b
色差(ΔE)	21.55±2.48 ^{bc}	22.15±0.89 ^{bc}	28.58±1.13 ^a	20.64±1.34 ^c	25.63±1.50 ^{ab}

注: 同行不同小写字母表示差异显著 $P<0.05$ 。

3 结论

本研究以 SA、LMPs 和 LBG 为主要成膜材料,辅以甘油增塑剂,成功制备出性能优异的 SA-LMPs-LBG 三元复合膜(简称 SPL 复合膜)。通过流变学分析和物理性能评估,确定了 SPL 复合膜的最佳质量比为 50:20:30,在该比例下的 SPL 复合膜其抗拉强度、断裂伸长率和透光率均显著提升,水蒸气透过率适中。其 SEM 和 FTIR 结果表明,该膜表面光滑、平整且紧密均一,各组分间分子相容性良好。此外,香菇脆片的品质分析表明,经过 SPL 复合膜液并进行 Ca^{2+} 交联处理的涂膜香菇其膨化效果更好,微观结构空腔尺寸更大,表明该 SPL 复合膜有助于 EPD 膨化过程的顺利进行,对 HA-EDP 香菇脆片膨化效果、品质提升的积极作用。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] EFTEKHARI A, SALEHI F, GOHARI ARDABILI A, et al. Effects of basil seed and guar gums coatings on sensory attributes and quality of dehydrated orange slices using osmotic-ultrasound method[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253: 127056.
- [2] YU F, LI Y, WU Z, et al. Dehydration of wolfberry fruit using pulsed vacuum drying combined with carboxymethyl cellulose coating pretreatment[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 134: 110159.
- [3] ISLAM M Z, SAHA T, MONALISA K, et al. Effect of starch edible coating on drying characteristics and antioxidant properties of papaya[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2019, 13: 2951–2960.
- [4] de OLIVEIRA M M G, SILVA K S. Effect of protein and polysaccharide-based edible coatings on quality of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) during drying[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2017, 13(12): 20170126.
- [5] RODRIGUEZ A, SOTERAS M, CAMPANONE L. Review: Effect of the combined application of edible coatings and osmotic dehydration on the performance of the process and the quality of pear cubes[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2021, 56: 6474–6483.
- [6] FARAHMANDFAR R, MOHSENI M, ASNAASHARI M. Effects of quince seed, almond, and tragacanth gum coating on the banana slices properties during the process of hot air drying[J]. *Food Science & Nutrition*, 2017, 5(6): 1057–1064.
- [7] SUI X, ZHAO Y, ZHANG X, et al. Hydrocolloid coating pretreatment makes explosion puffing drying applicable in protein-rich foods—a case study of scallop adductors[J]. *Drying Technology*, 2020, 40(1): 50–64.
- [8] YOUNIS H G R, ABDELLATIF H R S, YE F, et al. Tuning the physicochemical properties of apple pectin films by incorporating chitosan/pectin fiber[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 159: 213–221.
- [9] OLIVEIRA D, SILVA K S. Effect of protein and polysaccharide-based edible coatings on quality of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) during drying[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2017, 13(12): 1095–1107.
- [10] CHAICHI M, BADII F, MOHAMMADI A, et al. Water resistance and mechanical properties of low methoxy-pectin nanocomposite film responses to interactions of Ca^{2+} ions and glycerol concentrations as crosslinking agents[J]. *Food Chemistry*, 2019, 293: 429–437.
- [11] GALUS S, LENART A. Development and characterization of composite edible films based on sodium alginate and pectin[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 115(4): 459–465.
- [12] 王碧, 廖立敏, 邱艳, 等. 一种新型生物膜材料-葡甘聚糖/海藻酸钠/羧甲基纤维素共混膜[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 46(6): 719–724. [WANG B, LIAO L M, QIU Y, et al. A novel biofilm material-glucomannan/sodium alginate/carboxymethyl cellulose blend film[J]. *Journal of Huazhong Normal University (Natural Science Edition)*, 2012, 46(6): 719–724.]
- [13] BALASUBRAMANIAN R, KIM S S, LEE J. Novel synergistic transparent κ -carrageenan/xanthan gum/gellan gum hydrogel film: mechanical, thermal and water barrier properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 118: 561–568.
- [14] VELÁSQUEZ P, MONTENEGRO G, VALENZUELA L M, et al. κ -Carrageenan edible films for beef: Honey and bee pollen phenolic compounds improve their antioxidant capacity[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124(PA): 107250.
- [15] CHENG J, WANG H, KANG S, et al. An active packaging film based on yam starch with eugenol and its application for pork preservation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 96: 546–554.
- [16] RANI P, TRIPATHY P P. Effect of ultrasound and chemical pretreatment on drying characteristics and quality attributes of hot air dried pineapple slices[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56: 4911–4924.
- [17] SHI D, YIN C, FENG X, et al. Effect of ultrasound and cellulase pre-treatment on the water distribution, physical properties, and nutritional components of *Lentinula edodes* Chips[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(4): 625–636.
- [18] CUQ B, AYMARD C, CUQ J O, et al. Edible packaging films based on fish myofibrillar proteins: Formulation and functional properties[J]. *Journal of Food Science*, 1995, 60(6): 1369–1374.
- [19] ZHANG L, LIU Z, HAN X, et al. Effect of ethanol content on rheology of film-forming solutions and properties of zein/chitosan film[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 134: 807–814.
- [20] MA Q, DU L, WANG L. Tara gum/polyvinyl alcohol-based colorimetric NH_3 indicator films incorporating curcumin for intelligent packaging[J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2017, 244: 759–766.
- [21] LONG Z, ZHAO M, ZHAO Q, et al. Effect of homogenisation and storage time on surface and rheology properties of whipping cream[J]. *Food Chemistry*, 2012, 131(3): 748–753.
- [22] MA Q, DU L, YANG Y, et al. Rheology of film-forming solutions and physical properties of tara gum film reinforced with polyvinyl alcohol (PVA)[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 63: 677–684.
- [23] de BONDY Y, HERMANS W, MOLDENAERS P, et al. Selective modification of wheat bran affects its impact on gluten-starch dough rheology, microstructure, and bread volume[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106348.
- [24] CASADO U, MUCCI V L, ARANGUREN M I. Cellulose nanocrystals suspensions: Liquid crystal anisotropy, rheology, and

films iridescence[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 261: 117848.

[25] XIAO C, GAO S, WANG H, et al. Blend films from chitosan and konjac glucomannan solutions[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2000, 76(4): 509–515.

[26] DIAB T, BILIADERIS C G, GERASOPOULOS D, et al. Physicochemical properties and application of pullulan edible films and coatings in fruit preservation[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2001, 81: 988–1000.

[27] 李晓雁, 曹博强, 杨红澎, 等. 三赞胶-海藻酸钠可食用复合膜的制备及性能[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(19): 255–260. [LI X Y, CAO B Q, YANG H P, et al. Preparation and properties of sanxan/sodium alginate edible composite film[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(19): 255–260.]

[28] WANG B, JIA D, WANG K, et al. Effects of NaOH treatment on structure and properties of blend films made by collagen, konjac glucomannan, and chitosan[J]. *Journal of Functional Materials*, 2005, 36(7): 1107–1112, 1115.

[29] MURILLO-MARTÍNEZ M M, PEDROZA-ISLAS R, LOBATO-CALLEROS C, et al. Designing $W_1/O/W_2$ double emulsions stabilized by protein-polysaccharide complexes for producing edible films: rheological, mechanical, and water vapour properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(4): 577–585.

[30] PAN H Y, JIANG B, CHEN J, et al. Blend-modification of

soy protein/lauric acid edible films using polysaccharides[J]. *Food Chemistry*, 2014, 151: 1–6.

[31] YAO F, ZHENG Y Z, GAO Y H, et al. Electrospinning of peanut protein isolate/poly-L-lactic acid nanofibers containing tetracycline hydrochloride for wound healing[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 194: 116262.

[32] IMAN D, HADDARAH A, OMAR F E L, et al. Characterization of food additive-potato starch complexes by FTIR and X-ray diffraction[J]. *Food Chemistry*, 2018, 260: 7–12.

[33] HUANG H D, WU M M, YANG H P, et al. Structural and physical properties of sanxan polysaccharide from *Sphingomonas sanxanigenens*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 144: 410–418.

[34] JIN L, QI H, GU X, et al. Effect of sodium alginate type on drug release from chitosan-sodium alginate-based *in situ* film-forming tablets[J]. *AAPS PharmSciTech*, 2020, 21(2): 55.

[35] SUI X, ZHAO Y, ZHANG X, et al. Hydrocolloid coating pretreatment makes explosion puffing drying applicable in protein-rich foods—a case study of scallop adductors[J]. *Drying Technology*, 2022, 40(1): 50–64.

[36] FERRARI C C, SARANTÓPOULOS C I G L, CARMELLO-GUERREIRO S M, et al. Effect of osmotic dehydration and pectin edible coatings on quality and shelf life of fresh-cut melon[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2013, 6(1): 80–91.