

PLA 镀铝膜/牛皮纸复合食品包装材料制备及性能研究

程 峥^{1,2,3*}, 农欣梅^{1,2,3}, 刘美仙^{1,2,3}, 毛凯韵^{1,2,3}, 宁梅^{1,2,3}, 肖乃玉^{1,2,3*},
王红蕾^{1,2,3}, 唐玲月^{1,2,3}, 苏森^{1,2,4}, 陈绍武⁵

(1.仲恺农业工程学院 轻工食品学院, 广州 510225; 2.广东省食品绿色包装工程技术研究中心,
广州 510225; 3.农业农村部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点实验室, 广州 510225;
4.广州中医药大学 中药资源科学与工程研究中心, 广州 510006;
5.丽的包装(广东)有限公司, 广东 潮州 521000)

摘要: **目的** 分析聚乳酸 (Polylactic Acid, PLA) 镀铝膜与牛皮纸复合对牛皮纸基复合材料性能的影响, 研究该纸基复合包装对提升中草药薄荷保鲜效果的作用, 探讨其在农产品包装保鲜领域的应用潜力。 **方法** 通过 PLA 镀铝膜与牛皮纸复合, 增强牛皮纸的阻隔性能和力学性能, 弥补单纯牛皮纸阻隔和力学性能较差的缺点。 **结果** 与 PLA 镀铝膜复合后的牛皮纸基复合材料力学性能、阻隔性能均得到显著提升; 复合包装对薄荷的应用研究测试表明, 该复合材料具有良好的阻隔性能和防霉性能, 且符合环保要求。 **结论** PLA 镀铝膜/牛皮纸复合包装能有效降低薄荷的质量损失率, 维持其颜色 and 新鲜度, 延长保鲜期限。感官评价结果表明, 牛皮纸基复合包装材料在维持薄荷的颜色、完整度和脆性方面表现更佳。

关键词: PLA 镀铝膜; 牛皮纸; 复合包装; 薄荷

中图分类号: TS206.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)05-0023-12

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.05.003

Preparation and Performance of PLA Aluminized Film/Kraft Paper Composite Food Packaging Materials

CHENG Zheng^{1,2,3*}, NONG Xinmei^{1,2,3}, LIU Meixian^{1,2,3}, MAO Kaiyun^{1,2,3}, NING Mei^{1,2,3},
XIAO Naiyu^{1,2,3*}, WANG Honglei^{1,2,3}, TANG Lingyue^{1,2,3}, SU Miao^{1,2,4}, CHEN Shaowu⁵

(1. College of Light Industry and Food Technology, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. Guangdong Engineering Research Center of Food Green Packaging, Guangzhou 510225, China;
3. Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Lingnan Specialty Food, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510225, China; 4. Research Center of Chinese Medicinal Resource Science and Engineering, School of Pharmaceutical Sciences, Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou 510006, China; 5. Guangdong Lide Packaging Co., Ltd., Guangdong Chaozhou 521000, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the effect of aluminized polylactic acid (PLA) film and kraft paper composite on the properties of kraft paper composites, study the effect of the paper composite packaging on the preservation of Chinese herbal medicine mint, and discuss its application potential in the field of packaging and preservation of agricultural products. The barrier properties and mechanical properties of kraft paper were enhanced by the composite of PLA

收稿日期: 2024-11-12

基金项目: 2022 年度潮安区科技计划项目 (安工科[2022]116 号); 广州市基础与应用基础研究-优秀博士“续航”项目 (2024A04J2301); 仲恺农业工程学院仲恺学者人才项目 (KA24YY07116); 广东省科技创新战略专项资金 (pdjh2024b204)

*通信作者

aluminized film and kraft paper, and the disadvantages of simple kraft paper were made up. The mechanical properties and barrier properties of kraft paper matrix composites with PLA aluminized films were significantly improved. The application of the composite packaging to mint showed that the composite had good barrier properties and anti-mold properties, and met the requirements of environmental protection. PLA aluminized film/kraft paper composite packaging can effectively reduce the weight loss rate of mint, maintain its color and freshness, and extend the freshness period. The results of sensory evaluation show that the kraft paper based composite packaging material has better performance in maintaining the color, integrity and brittleness of mint.

KEY WORDS: PLA aluminized film; kraft paper; composite packaging; mint

纸张及纸基包装材料凭借成本低、可再生、无毒可降解等特点,符合可持续发展、碳中和、绿色包装、以纸代塑等理念。由于纸张是一种具有多孔三维网络结构的生物基薄层材料,且纸纤维表面有大量的活性羟基,导致纸质包装存在阻隔性能及力学性能差等局限性^[1],需通过涂布、真空镀铝等后加工工艺处理,提高复合包装纸整体的阻隔性能和力学性能。目前,国内外研究学者对阻隔水蒸气和氧气功能包装纸开展了多方面的研究。李志颖^[2]利用竹茹纤维(Bamboo Shavings Fibre, BSFs)与聚乳酸(Polylactic Acid, PLA)超细纤维共混,通过湿法抄造工艺制备的BSFs/PLA复合抗菌纸具有良好的阻隔性能及透气性能。王飞杰等^[3]将PLA和纳米氧化锌复配后采用涂布工艺制备食品包装纸,与未经处理的食物包装纸相比,结果表明,复配后的聚乳酸-纳米氧化锌复合疏水抗菌食品包装纸对水蒸气、二氧化碳等气体的阻隔性能较好且具备一定的疏水性能。王颖赛等^[4]通过物理共混法将PLA加入聚对苯二甲酸-己二酸-丁二醇酯(PBAT),制备的PBAT/PLA/CaCO₃复合材料具有良好的力学性能。何和智等^[5]将PLA和PBAT熔融共混,结果表明,PLA与PBAT共混后的复合材料既具有合适的导电性能,又具有优良的力学性能。以上研究表明,PLA具有提高纸基包装力学性能的潜在能力。林渊智^[6]将聚氯乙烯(Polyvinyl Chloride, PVC)经过真空镀铝制备了一种功能性包装纸,发现PVC在镀铝膜后防潮、阻气等阻隔性显著提高,可见真空镀铝工艺可以提高纸张阻隔性能。

由于PLA具备提高纸基包装力学性能及阻隔性能的潜力^[7],为了制备高性能环保型功能包装纸,本研究将PLA作为基体材料。但PLA的基本结构为由乳酸分子通过酯化反应形成的直链型分子结构,可能会导致PLA的力学性能、结晶性及阻隔性能较差。通过真空镀铝工艺在PLA表面镀上一层铝膜作为包装纸的复合材料,可形成致密均匀的网络结构,提高包装用纸的阻隔性能和力学性能,也可提高PLA镀铝膜/牛皮纸复合材料的疏水性能。本文将PLA改性得到的PLA镀铝膜与牛皮纸进行复合处理,探讨PLA镀铝膜对牛皮纸的水蒸气阻隔性能、氧气透过性能、抗水性能和拉伸性能的影响。为考察牛皮纸基复合材料在农产品包装保鲜上的应用效果,采用PLA镀铝

膜/牛皮纸复合材料对薄荷进行保鲜效果的验证。实验结果表明,PLA镀铝膜/牛皮纸复合材料在降低薄荷质量损失率、维持其色泽与新鲜度以及延长保鲜期限方面表现出较大优势,证明该材料在湿度敏感型农产品包装领域具有巨大的应用潜力。本研究对推动环保包装材料的发展、提高农产品的保鲜效果和经济效益具有重要的实际意义,可为绿色环保型功能食品包装的发展提供宝贵的参考,助力包装行业的高质量发展。

1 实验

1.1 原料

主要材料:新鲜薄荷(500 g),绿食者蔬菜官方旗舰店;变色硅胶(500 g),乳山市泰合干燥剂有限公司;PLA镀铝膜(0.03 mm厚)、白色牛皮纸(35 g/m²)、PLA镀铝膜/牛皮纸(85 g/m²),实验室自制。

主要仪器:FA2204B电子天平,上海佑科仪器仪表有限公司;GB-3数显测厚规,深圳市汉普检测仪器有限公司;XHDHG系列电热鼓风干燥箱,TOMOS生命科学集团;GBH-1PC型智能电子拉力机,广州标际包装设备有限公司;Quanta 250扫描式电子显微镜,美国FEI公司;TG209F1热重分析仪,德国NETZSCH公司;SW-CJ洁净工作台,苏州安泰空气技术有限公司;JC2000C1接触角测量仪,上海中晨数字技术设备有限公司;NR10QC色差测色仪,广东三恩时智能科技有限公司;Nicolet iS50傅里叶变换红外光谱仪,美国Thermo Fisher Scientific。

1.2 PLA镀铝膜/牛皮纸制备

对牛皮纸和PLA镀铝膜这2种材料的表面进行必要的加工,以提高黏接剂的黏附力。然后将环保型黏接剂均匀涂布在牛皮纸的一面,并与PLA镀铝膜进行热压复合,形成紧密的层压结构。最后进行固化处理,以保证黏接剂完全硬化,形成牢固的PLA镀铝膜/牛皮纸复合材料。

1.3 PLA镀铝膜/牛皮纸性能表征

1.3.1 水蒸气透过率

采用装有水的干燥器,实验测定牛皮纸水蒸气透过率^[8]。称取15 g变色硅胶作为干燥剂,该硅胶能够

吸收透过纸张的水蒸气。使用一张无损的牛皮纸覆盖称量瓶的瓶口,并用橡皮筋将其固定,模拟实际包装的封闭状态,记录密封后称量瓶的初始质量。实验周期为 7 d,在此期间需每隔 24 h 取出称量瓶,使用高精度天平测量并记录其质量变化。水蒸气透过率的计算见式(1)。

$$W_{\text{VT}} = \frac{m \cdot L}{t \cdot A \cdot \Delta P} \quad (1)$$

式中: m 为 7 d 样品总的增加质量, g; t 为时间, s; A 为称量瓶瓶口的面积, m^2 ; L 为膜/纸的厚度, mm; ΔP 为常数, 取 $2\,339\text{ Pa}^{[9]}$ 。

1.3.2 吸水性测试

根据 GB/T 461.3—2005, 从待测牛皮纸及复合纸上精确裁剪出符合标准尺寸的试样, 使用高精度天平测量并记录每片试样的初始干质量。再次精确测量并记录其湿质量, 计算试样吸水性^[10]。试样浸泡时间以及挤出水分等后处理遵循标准规定的要求。

1.3.3 接触角

利用接触角测定仪的摄像头和软件捕捉水滴形态并计算接触角, 以去离子水为测试液, 在纸样表面滴 $2\text{ }\mu\text{L}$, 每个样品在 5 个不同位置进行测量并取平均值。接触角反映了纸样疏水性能的强弱^[11]。

1.3.4 力学性能分析

采用电子万能试验机, 按照《纸和纸板 抗张强度的测定 恒速拉伸法(20 mm/min)》(GB/T 12914—2018) 进行测定。测试中设置试样的实验速度为 50 mm/min , 标距为 25 mm , 记录每条试样在断裂前承受的最大抗拉强度以及断裂时的伸长量。抗拉强度和断裂伸长率的计算分别见式(2)~(3)。

$$T_s = \frac{F}{S} \quad (2)$$

式中: T_s 为样品膜的抗拉强度, MPa; F 为样品膜在测试中受到的拉力, N; S 为样品膜的横截面积, m^2 。

$$E = \frac{D - D_0}{D_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: E 为样品膜的断裂伸长率, %; D_0 为样品膜的原始标准距离, mm; D 为样品膜断裂时的标准距离, mm。

1.3.5 表面微观形貌分析

使用扫描电子显微镜(Search Engine Marketing, SEM)分析纸样表面成膜情况以及 PLA 镀铝膜/牛皮纸复合材料镀铝面的微观结构^[12], 裁剪纸样并进行适当的喷涂处理, 以便在 SEM 的真空环境中进行高分辨率扫描。

1.3.6 红外光谱分析

使用傅里叶变换红外光谱仪(Fourier Transform

Infrared Spectrometer, FTIR)分析材料对特定红外波长吸收强度的吸收强度, 识别材料中的官能团及其分子结构^[13-14]。将样品放入 FTIR 的样品池, 设置测试波长为 $550\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 。

1.3.7 热重分析

使用热重分析仪^[15]将尺寸为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的样品放入坩埚进行加热, 仪器自动记录并生成热重曲线。

1.3.8 氧气透过系数

使用库仑法^[16]测量氧气透过系数, 试样将透气室分成 2 部分, 一侧通氧气, 另一侧通氮气作为载气。透过试样的氧气随氮气一起进入库仑计发生化学反应, 并产生电压, 该电压与单位时间内通过库仑计的氧气数量成正比。

1.4 PLA 镀铝膜/牛皮纸包装材料保鲜实验

1.4.1 保鲜包装样品处理

实验分为空白组(牛皮纸包装)和实验组(PLA 镀铝膜/牛皮纸包装)2 组。实验组所使用的复合包装材料由 35 g/m^2 的白色牛皮纸和 PLA 镀铝膜复合而成, 镀铝层直接与薄荷接触^[17]; 空白组为 35 g/m^2 的牛皮纸包装。每组随机选取 4 棵薄荷, 定期观察和记录薄荷的新鲜度、质量、颜色和叶片状态等。

1.4.2 质量损失率

在第 0 天准确称量所包装的薄荷总质量, 记为 m_1 , 每隔 24 h 称量一次, 其质量记为 m_2 。薄荷质量损失率测定见式(4)^[18]。

$$W_{\text{loss}} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (4)$$

1.4.3 色差

贮存时分别使用 PLA 镀铝膜/牛皮纸和牛皮纸包装薄荷, 使用色差仪测定薄荷的亮度 L 、红度 a 、黄度 b 。色差的计算见式(5)。

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (5)$$

1.4.4 感官评价

对实验组和空白组进行 7 d 的储藏, 每隔 24 h 记录薄荷的完整度、颜色和脆性, 并对其进行感官评价。感官评价由 5 名成员进行评分, 评分标准见表 1。

1.5 数据处理与分析

使用 Origin 2022 软件制作图表, 并用 SPSS 27.0 以及 Excel 2023 软件对数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 纸张的厚度分析

测量牛皮纸、PLA 镀铝膜、PLA 镀铝膜/牛皮纸样品的厚度, 每种样品测量 5 次后取平均值, 结果见表 2。

表 1 感官评价评分标准
Tab.1 Sensory evaluation scoring criteria

分值	颜色	完整度	脆性	气味
10	绿色, 明亮有光泽	好	好	有特殊气味, 无异味
7	黄色, 明亮无光泽	较好	较好	特殊气味减弱, 无异味
5	褐绿色, 无光泽	一般	一般	特殊气味较淡, 稍有异味
3	土黄色, 无光泽	差	差	无特殊气味, 有明显腐败酸臭味

表 2 不同样品的厚度
Tab.2 Thickness of different samples

样品	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均值
牛皮纸	0.053	0.058	0.055	0.050	0.056	0.054
PLA 镀铝膜	0.029	0.026	0.033	0.028	0.030	0.029
PLA 镀铝膜/牛皮纸	0.096	0.098	0.089	0.093	0.094	0.094

2.2 阻隔性能分析

不同试样的水蒸气透过率如图 1a 所示, 可见牛皮纸的水蒸气透过率最高, 为 $99.941 \times 10^{-12} \text{ g} \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kPa})$, PLA 镀铝膜的水蒸气透过率为 $21.812 \times 10^{-12} \text{ g} \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kPa})$, PLA 镀铝膜/牛皮纸复合材料的水蒸气透过率仅为 $7.971 \times 10^{-12} \text{ g} \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kPa})$ 。结果表明, PLA 镀铝膜/牛皮纸复合材料比单一的 PLA 镀铝膜或牛皮纸的水蒸气透过率都小, 说明 PLA 镀铝膜与牛皮纸的结合在一定程度上增强了复合包装材料的阻隔性能, 有利于减少环境湿度对产品的不利影响。这样的复合工艺对于提高包装材料的防潮性能至关重要, 尤其是对湿度敏感的产品, 如食品、农产品等。图 1b 为不同样品的氧气透过系数, 试样厚度均为 $41 \mu\text{m}$, 牛皮纸、PLA 镀铝膜、PLA 镀铝膜/牛皮纸的氧气透过系数分别为 $10\ 104.335$ 、 750.522 、 $2.436 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$, 可见 PLA 镀铝膜展现出显著的阻隔能力, 当它与牛皮纸复合制成 PLA 镀铝膜/牛皮纸复合材料时, 氧气透

过系数显著降低。根据图 1 可以推测, PLA 镀铝膜/牛皮纸相较于牛皮纸, 在对农产品的保鲜应用中能够更好地抑制新鲜农产品的呼吸作用, 延长其保鲜周期。

2.3 吸水性分析

测试牛皮纸、PLA 镀铝膜/牛皮纸样品的吸水性, 每种样品测量 5 次后取平均值, 结果见表 3, 可见 PLA 镀铝膜/牛皮纸的吸水性低于牛皮纸, 这种差异主要归因于复合材料中加入的 PLA 和镀铝膜^[19]。PLA 在纤维形态下显示出优秀的吸湿和导湿能力, 它在复合材料中通常形成均匀的薄膜, 吸湿性能并不明显, 不过仍保持一定的阻水性^[20], 这表明 PLA 镀铝膜/牛皮纸能够在一定程度上提升包装的防水性能, 具备更好的保湿性能, 更适用于一些需要防潮防湿的领域。更低的吸水性有助于延长产品的保质期, 即使在潮湿环境下也能保持产品的原有风味和口感。低吸水性还减少了包装材料在潮湿环境中的质量增加, 有利于控制物流成本, 保持包装材料的力学性能, 提高其耐用性。

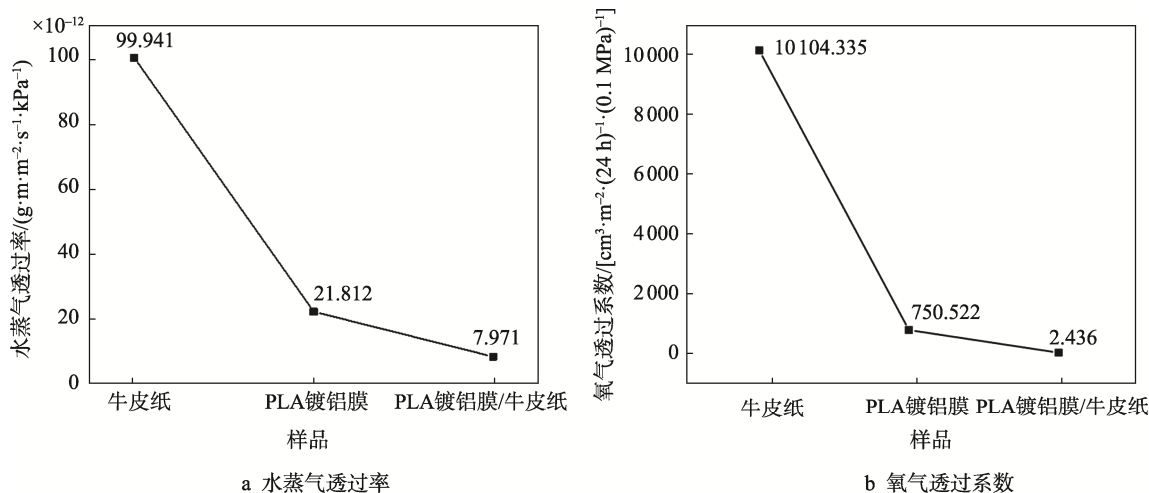


图 1 不同样品的水蒸气透过率和氧气透过系数

Fig.1 Water vapor transmittance and oxygen transmittance coefficient of different samples

表 3 不同样品的吸水性分析结果
Tab.3 Water absorption analysis of different samples g/m²

样品	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均值
牛皮纸	61.13	64.36	66.54	68.95	64.77	65.15
PLA 镀铝膜/牛皮纸	36.63	4.04	41.65	39.99	35.64	39.19

2.4 接触角分析

不同样品的水接触角见图 2, 可见各类纸样的表面接触角存在显著差别。牛皮纸的接触角为 88.15°; PLA 镀铝膜的接触角为 69.50°, PLA 镀铝膜/牛皮纸复合材料镀铝膜面的接触角最大, 为 118.06°; PLA 镀铝膜/牛皮纸复合材料牛皮纸面的接触角为 73.73°。图 2 结果表明牛皮纸和镀铝膜以及黏结剂与牛皮纸接触部分具有一定的亲水性, 复合后得到的 PLA 镀铝膜/牛皮纸复合材料的镀铝膜面表现出一定的疏水性, 说明 PLA 材料本身具有一定的疏水性, 从而使得 PLA 镀铝膜/牛皮纸复合材料镀铝膜面具有更强的疏水性, 原因可能是 PLA 材料形成一张相对疏水的涂层薄膜。此外, 复合材料的疏水性可能与材料表面的粗糙程度有关。相较于牛皮纸表面以及黏结剂和牛皮纸接触部分表面, PLA 镀铝膜/牛皮纸复合材料镀铝膜面更加光滑, 更易于增大接触角^[21]。这种疏水质能够有效防止水分的渗透, 减少因产品吸湿而引起的腐败, 从而延长产品的保鲜期, 提升其安全性。由于水分是微生物生长的关键因素, 疏水性包装材料能够抑制微生物的生长, 进一步提升产品的安全性^[22]。在实际观察中, 水滴在纸样上 3 min 后, 牛皮纸上能明显看到水的渗透迹象, 而 PLA 镀铝膜/牛皮纸复合材料镀铝膜面很少发生渗透现象^[23]。

2.5 力学性能分析

力学性能测试结果见图 3。由图 3a 可知, 牛皮纸和 PLA 镀铝膜/牛皮纸的抗拉强度较小, 分别为

1.56、6.87 MPa, PLA 镀铝膜的抗拉强度最大, 为 131.94 MPa。PLA 镀铝膜/牛皮纸的抗拉强度介于两者之间, 这归因于复合材料的独特结构和组成材料的特性。在复合过程中, 牛皮纸的天然纤维强度与 PLA 镀铝膜的金属特性相结合, 通过良好的界面结合和应力的均匀分布产生了协同效应, 从而提高了 PLA 镀铝膜/牛皮纸整体的拉伸性能^[24]。材料层的取向、各组分的比例以及复合过程中可能出现的缺陷和弱点, 都会影响最终的抗拉强度^[25]。虽然 PLA 镀铝膜/牛皮纸的抗拉强度不是简单叠加 2 种材料的强度, 但通过优化生产工艺和材料配比, 可以实现力学性能的有效平衡, 从而获得介于单一牛皮纸和 PLA 镀铝膜之间的抗拉强度, 满足特定应用的需求。由测试结果可知, 复合材料的耐用性得到增强, 使得包装在面对外力作用时不易破裂或损坏, 为包装内的产品提供更加可靠的物理保护。

图 3b 为不同样品的断裂伸长率, PLA 镀铝膜/牛皮纸的断裂伸长率低于单一材料, 这可能是由于多种因素的协同作用^[26]。首先, PLA 镀铝膜的加入提高了整体刚性, 减少了材料的柔韧性和延展性^[27]。其次, 不同材料之间的界面结合可能会限制纤维间的相对移动, 降低材料断裂前的最大伸长能力。再次, 由于金属膜通常不易伸长, PLA 镀铝膜的加入可能会限制牛皮纸的伸长^[28]。最后, 复合结构可能导致应力集中, 进而影响材料的均匀变形。另外, 使用的添加剂和黏合剂、生产工艺条件以及不同材料的分子间作用力, 都可能影响断裂伸长率。

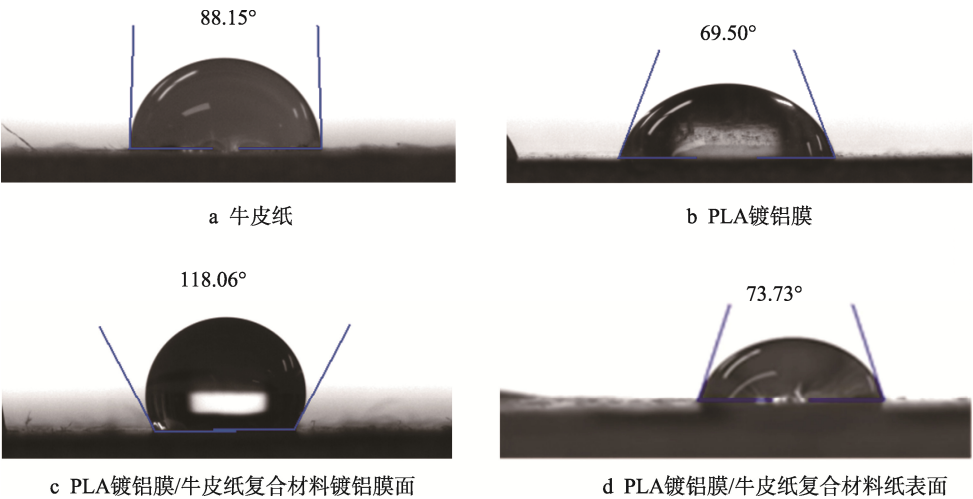


图 2 不同样品的水接触角
Fig.2 Water contact angle test results of different samples

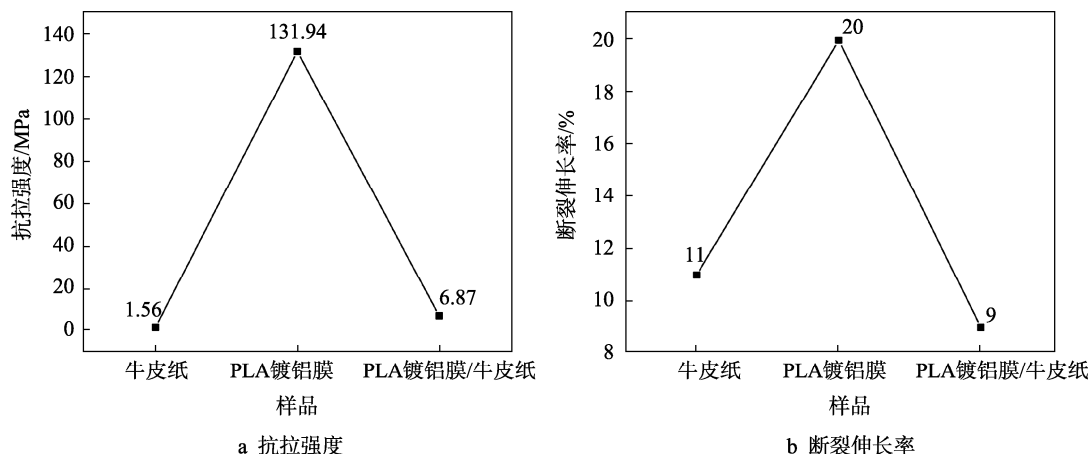


图 3 不同样品的抗拉强度和断裂伸长率
Fig.3 Tensile strength and elongation at break of different samples

不同样品的物理性能见表 4, 可见 PLA 镀铝膜/牛皮纸具有较高的紧度, 这种材料的结构稳定性和耐压性更强, 能够更有效地保护产品在储存和运输过程中免受物理损伤, 减少包装破损的风险。高紧度还与良好的阻隔性能相关, 有助于减少氧气和水蒸气透过, 从而延长产品的保质期, 提升保鲜效果。由于高紧度的 PLA 镀铝膜/牛皮纸允许使用更薄的材料以保持所需的强度, 不仅有助于减少材料消耗和成本, 也提升了包装的环保性能。

2.6 表面微观形貌分析

图 4 为牛皮纸、PLA 镀铝膜和 PLA 镀铝膜/牛皮纸分别在 200 倍和 500 倍下纸张表面形态的扫描电镜。由图 4 可知, 牛皮纸表面粗糙且孔隙较多, 对小分子的阻隔性能较差, 容易被气体和液体渗透。经过金属化处理的 PLA 镀铝膜表面变得光滑, 在 SEM 下未看到明显孔洞, 可见 PLA 镀铝膜与牛皮纸的结合有助于提升复合材料的阻隔性能。本文采用的环保型黏结剂-水性丙烯酸酯聚合乳液, 具有提升复合材料的强度和改善流平性等特性, 能够显著减少黏结剂侵蚀牛皮纸层导致的层间分离问题, 有助于减少孔隙的生成。通过乳液聚合技术制得的聚合物, 不仅具有较低的涂布黏度, 还展现出卓越的流平性能, 有助于涂料在牛皮纸表面均匀铺展, 形成光滑表面。这些特性能够有效阻止液体或气体渗透, 确保复合材料优越的阻隔性能。

2.7 红外光谱分析

不同样品的红外光谱见图 5。牛皮纸样品在 $1\ 657\ \text{cm}^{-1}$ 处显示出的吸收峰表明存在羰基官能团, 这通常与酮和酯等化合物相关; 在 $1\ 147\ \text{cm}^{-1}$ 处的另一个吸收峰证明可能存在脂肪族 C—O—C 键或羧酸根; 这些官能团可能与醚、酯和羧酸盐等化合物相关。这些官能团的发现对于理解牛皮纸的化学组成和物理化学性质至关重要, 不仅揭示了牛皮纸的潜在化学活性, 还为如何根据特定应用需求设计和改进牛皮纸产品提供了重要信息^[29], 同时它们在决定样品的柔韧性、溶解性、稳定性、反应性和水溶性等特性方面发挥着显著作用。分析 PLA 镀铝膜/牛皮纸时发现, 在 $1\ 463\ \text{cm}^{-1}$ 处存在吸收峰, 该峰的出现可能是受 $3\ 706\ \text{cm}^{-1}$ 处羟基吸收峰的影响, 羰基官能团振动频率降低, 即波数变小, 导致出现新的吸收峰。由于氢键作用减弱了 O—H 键的振动强度, 可能使吸收峰变宽且强度增加。溶剂和环境的极性也会影响羟基的振动频率, 极性溶剂会增加频率, 非极性溶剂则相反。羟基的浓度变化, 特别是在浓溶液或固态中会增强氢键作用, 进一步影响吸收峰的位置。电子效应方面, 羟基的电子密度影响相邻碳原子的电子云密度, 可能会使相邻的 C—H 伸缩振动频率降低。总之, 复合后得到的 PLA 镀铝膜/牛皮纸相较于牛皮纸, 官能团未发生太大变化, 化学特性改变较小。

表 4 不同样品的物理性能
Tab.4 Physical properties of different samples

样品	平均厚度/mm	定量/(g·cm ⁻²)	紧度/(g·cm ⁻³)	松厚度/(cm ³ ·g ⁻¹)
牛皮纸	0.054	3.756×10^{-3}	2.511 1	0.391 9
PLA 镀铝膜/牛皮纸	0.094	8.713×10^{-3}	92.7	1.097

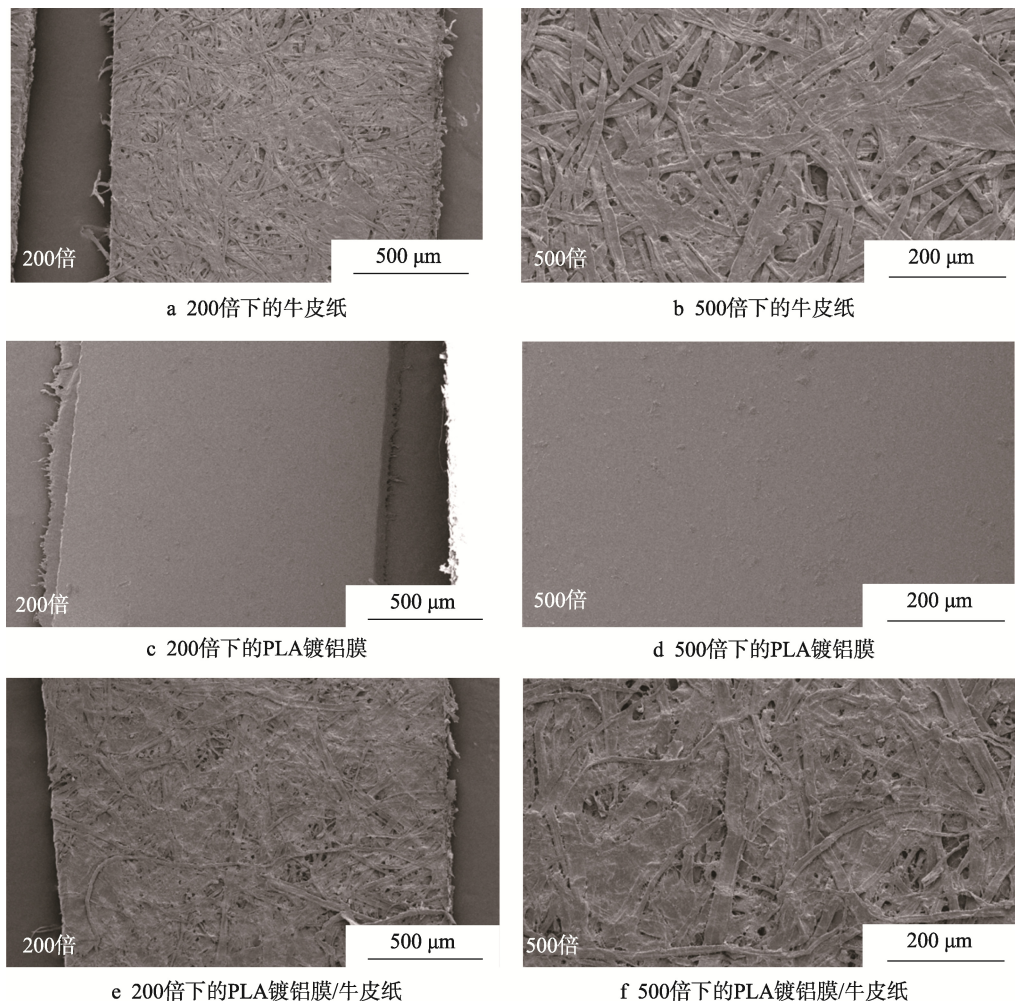


图 4 不同样品的表面扫描电镜
Fig.4 Surface scanning electron microscopy of different samples

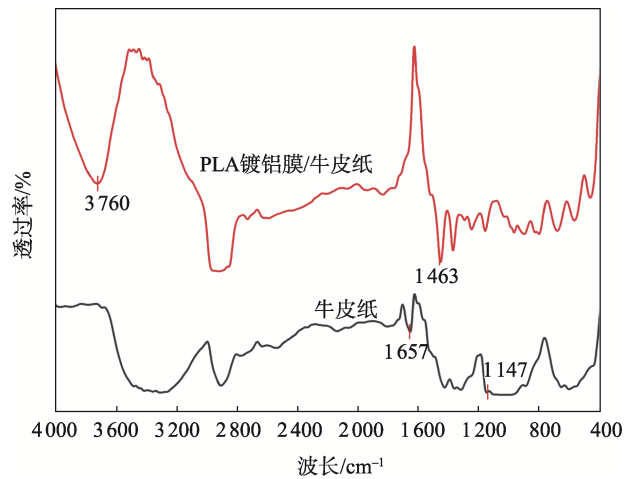


图 5 不同样品的红外光谱
Fig.5 Infrared spectral results of different samples

2.8 热重分析

图 6 为不同样品的热重曲线(Thermogravimetry, TG)与微分热重分析(Differential Thermal Gravity,

DTG) 曲线, 可见牛皮纸与 PLA 镀铝膜在刚开始加热时都出现不同程度的质量增加现象。这可能是因为气氛中存在水蒸气, 样品吸湿导致质量增加, 或者样品称量不准确导致读数增加。牛皮纸 TG 曲线的失重台阶为 280~450 °C, 累计质量损失率为 7.05%, 在 40 °C附近出现明显失重峰。PLA 镀铝膜 TG 曲线的失重台阶为 350~500 °C, 累计质量损失率为 100.37%, 其中一部分质量损失率可能是气氛中的水蒸气所致, 在 450 °C附近有明显失重峰, 最后剩余质量分数为 0.26%。PLA 镀铝膜/牛皮纸 TG 曲线的失重台阶为 250~450 °C, 累计质量损失率为 77.88%, 在 350 °C附近有明显失重峰。

2.9 薄荷包装保鲜质量损失率分析

质量损失率是评价薄荷保鲜效果的关键指标, 与薄荷在储存过程中的水分保持能力直接相关^[27]。采摘后的薄荷由于呼吸作用和蒸腾作用会逐渐失去水分, 影响其新鲜度和市场价值。质量损失率较低意味着薄荷在贮藏期间的水分损失较少, 能够更好地维持新鲜

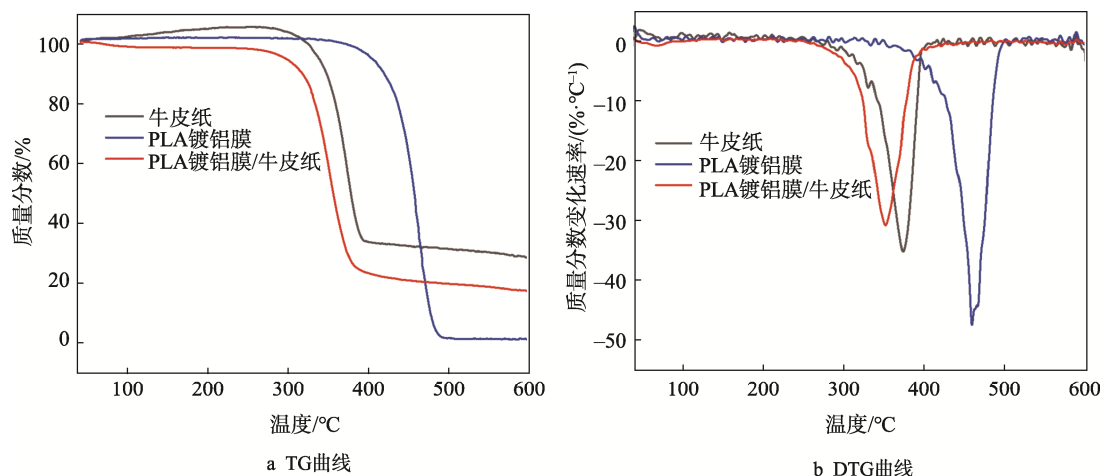


图6 不同样品的热重分析
Fig.6 Thermogravimetric analysis of different samples

度和品质。图 7a 中, 2 组样品的质量损失率表现出显著差异, 随着包装时间的延长, 这种差异更加明显, 说明 PLA 镀铝膜/牛皮纸能够很好地保存薄荷的水分。在 7 d 贮存期间, 薄荷会失去部分水分和被微生物分解的营养物质^[30-32]。复合包装第 7 天的质量损失率与牛皮纸第 2 天的质量损失率相当, 表明相较于牛皮纸, 使用复合包装的薄荷拥有更长的保质期, 能够贮存更久。PLA 镀铝膜/牛皮纸优异的保湿效果不仅有助于保持农产品的新鲜度和营养价值, 还能提升产品在市场中的竞争力, 满足消费者对高品质食品的需求。

2.10 薄荷包装保鲜色差分析

色差是衡量农产品贮存过程中颜色变化的一个重要指标, 对保持农产品的商品价值和市场竞争力至关重要^[33]。色差变化可以反映薄荷内部营养成分的变化, 色差较小意味着贮存期间颜色稳定, 有助

于维持其外观品质。由图 7b 可知, 牛皮纸组在前 3 d 颜色变化最为明显, 之后的色差值一直在增大, 在第 7 天达到 28.32, 此时薄荷颜色褐黄, 叶柄及整个叶片部分脱水严重。使用复合包装的薄荷色差值与空白组第 4 天的色差值相当, 这表明 PLA 镀铝膜/牛皮纸包装能够很好地阻止薄荷褐变, 对于维持薄荷的新鲜度和外观品质至关重要。复合包装通过优秀的阻隔性能减少氧气和水分的交换, 降低氧化作用和微生物活动, 同时为薄荷提供物理保护。镀铝膜的避光特性有助于减少光照影响, 包装的隔热性能有助于维持稳定的贮存环境。这些特性共同作用, 形成有利于薄荷保鲜的局部微观环境, 延缓薄荷的成熟和衰老过程。

2.11 薄荷包装保鲜感官评价

在薄荷保鲜过程中, 其感官特性是评估新鲜度的重要依据。首先, 颜色是最直接的视觉指标, 新

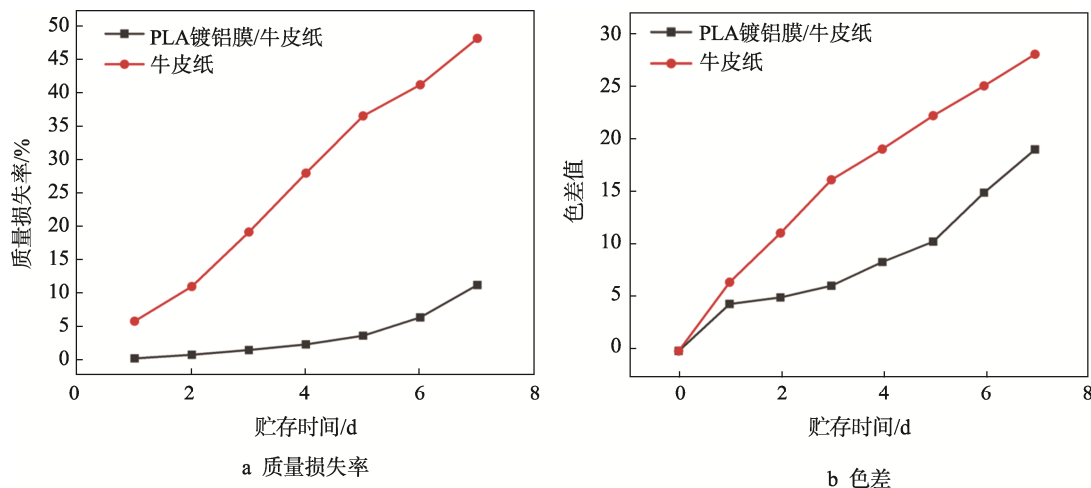


图7 不同包装中薄荷的质量损失率和色差
Fig.7 Weight loss rate and color difference of mint in different packages

鲜的薄荷叶片呈现鲜绿色, 颜色的亮度和均匀性可以直观反映薄荷的生机。随着时间的延长, 薄荷叶片可能会逐渐变黄或出现斑点, 这是叶片开始衰老的迹象。其次, 脆性是判断薄荷新鲜度的一个关键因素。新鲜的薄荷在折断时会发出清脆的声音, 这是因为其细胞结构完整且充满水分。相反, 如果薄荷叶片变得柔软, 缺乏弹性, 通常意味着它已经失去一部分水分, 不再处于新鲜状态。再次, 叶片的完整度同样很重要, 它不仅影响薄荷的外观, 还关系到薄荷在采摘、储存和运输过程中是否遭受损伤。新鲜薄荷的叶片应完整无缺, 没有破损或枯萎的迹象, 这样可以保证其风味和营养价值得到最大限度的保留。最后, 气味是薄荷最显著的特征。新鲜薄荷具有一种清新且提神的香气, 香气的强度和纯度可以作为判断其新鲜度的一个重要依据。如果薄荷的气味变淡或者带有其他异味, 说明它可能已经开始变质, 品质下降。

通过综合考虑薄荷的颜色、脆性、完整度和气味这 4 个方面, 可以较为准确地判断薄荷的新鲜度^[34-35]。薄荷的外观变化见图 8, 评分结果见图 9。由图 9 可知: PLA 镀铝膜/牛皮纸在薄荷储藏期间能更好地维持薄荷的颜色、完整度与脆性; PLA 镀铝膜/牛皮纸有更强的阻隔性能, 能够更好地隔绝氧气, 减缓薄荷的褐变, 从而延缓薄荷的变质, 使薄荷的特殊气味能够存留更长时间; PLA 镀铝膜/牛皮纸与牛皮纸包装的完整度和脆性差距不大, PLA 镀铝膜/牛皮纸对薄荷的保护效果更佳。整体来看, PLA 镀铝膜/牛皮纸复合材料包装保鲜前景广阔。



图 8 薄荷贮存 7 d 外观变化
Fig.8 Appearance changes of mint stored for 7 days

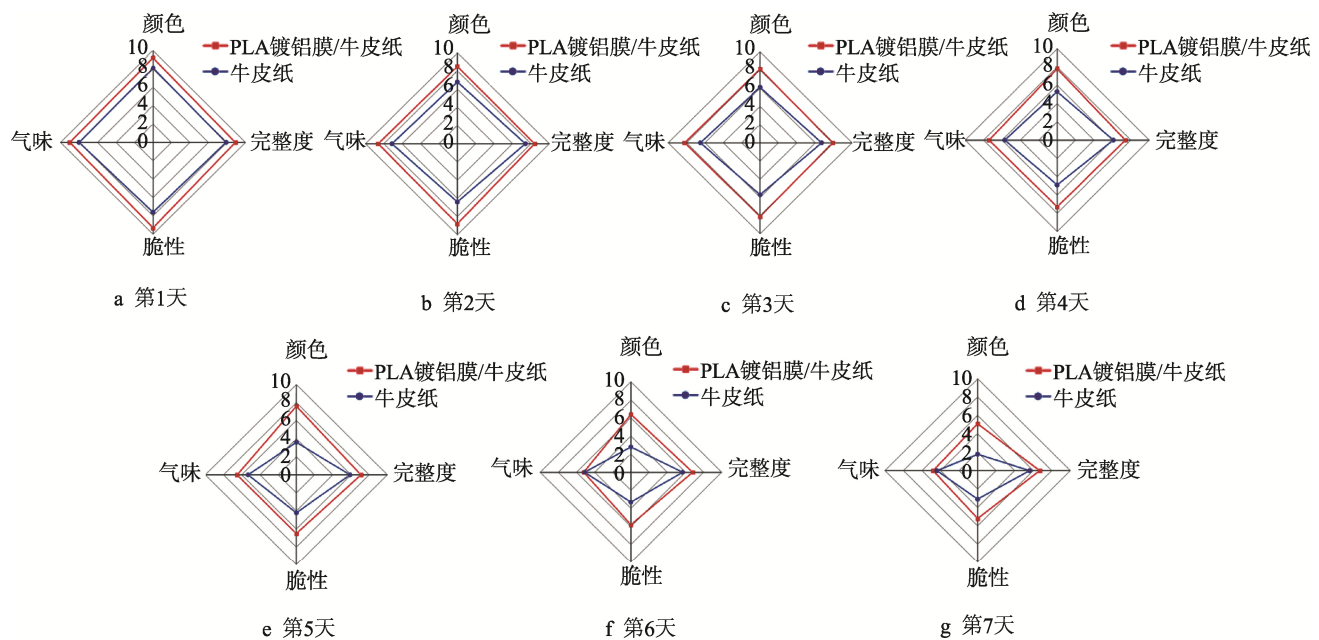


图 9 薄荷保鲜 (7 d) 评分雷达图
Fig.9 Rating radar chart of mint freshness (7 days)

3 结语

针对当前对环保性包装材料的需求,制备了一种新型的 PLA 镀铝膜/牛皮纸复合食品包装材料,并分析其各项性能,探讨其对中草药薄荷包装的保鲜效果。研究表明,经过牛皮纸和 PLA 镀铝膜复合后得到的 PLA 镀铝膜/牛皮纸复合材料阻隔性能及力学强度得到显著提升。复合材料包装对中草药薄荷的应用测试结果表明,PLA 镀铝膜/牛皮纸包装材料具有良好的阻隔性能和防霉性能,有助于保持薄荷的储藏品质,且符合环保低碳的要求。PLA 镀铝膜/牛皮纸因具有环保特性和功能特性,适用于各种对湿度敏感的农产品包装,能保证农产品的包装质量。高接触角的 PLA 镀铝膜/牛皮纸还可以与智能标签等技术结合,用于监测包装内的产品状态,提升食品包装的智能化水平。

参考文献:

- [1] 李维沐,吴慧敏,黄际太,等. 应用于食品领域的纸基功能性包装材料研究进展[J]. 中国造纸, 2024, 43(9): 129-137.
LI W M, WU H M, HUANG J T, et al. Progress on the Applications of Paper-Based Functional Packaging Materials in Food Field[J]. China Pulp & Paper, 2024, 43(9): 129-137.
- [2] 李志颖. 高强度聚乳酸抗菌可降解纸的制备及其性能研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2024.
LI Z Y. Preparation and Properties of High Strength Polylactic Acid Antibacterial Degradable Paper[D]. Wuhan: Wuhan Textile University, 2024.
- [3] 王飞杰,王利强,张新昌. 聚乳酸-纳米氧化锌复合疏水抗菌食品包装纸的制备及其在鲜肉保鲜中的应用[J]. 中国食品学报, 2022, 22(5): 228-238.
WANG F J, WANG L Q, ZHANG X C. Preparation of Hydrophobic Antibacterial Food Wrapping Paper with Polylactic Acid and Nano-Zinc Oxide Composite and Its Application in Fresh Meat Preservation[J]. Chinese Journal of Food Science, 2022, 22(5): 228-238.
- [4] 王颖赛,张智强,徐佳,等. PLA 增强改性 PBAT/CaCO₃/PEG400 复合材料的制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2025, 53(1): 158-162.
WANG Y S, ZHANG Z Q, XU J, et al. Preparation and Properties of PLA Reinforced Modified PBAT/CaCO₃/PEG400 Composites[J]. New Chemical Materials, 2025, 53(1): 158-162.
- [5] 何和智,黄宗海,赖文,等. PLA/PBAT/CB 防静电包装材料制备及其性能研究[J]. 中国塑料, 2024, 38(7): 1-8.
HE H Z, HUANG Z H, LAI W, et al. Preparation and Properties of PLA/PBAT/CB Anti-Static Packaging Materials[J]. Chinese Plastic, 2024, 38(7): 1-8.
- [6] 林渊智. PVC-T 型镀铝膜的研制[J]. 塑料包装, 2004, 14(3): 33-35.
LIN Y Z. Development of PVC-T Aluminum Plating Film[J]. Plastics Packaging, 2004, 14(3): 33-35.
- [7] 顾春生. 真空镀膜在高阻隔性包装材料上的应用[J]. 塑料包装, 2014, 24(3): 31-35.
GU C S. Vacuum Coating Manufactured High-Performance Barrier Film for Packaging Applications[J]. Plastics Packaging, 2014, 24(3): 31-35.
- [8] AAKASH U, LUCIAN L, LOKENDRA P. Harnessing Total Chemical-Free Paper and Packaging Materials Barrier Properties by Mechanical Modification of Cellulosic Fibers for Food Security and Environmental Sustainability[J]. Applied Materials Today, 2023, 25: 101973.
- [9] 敬兴,黄海洋,骆华英,等. 环保型 PLA/CNF 应用于纸张阻隔性涂布的研究[J]. 中国造纸学报, 2022, 37(3): 86-93.
JING X, HUANG H Y, LUO H Y, et al. Study on Application of Environmentally Friendly PLA/CNF to Paper Barrier Coating[J]. Chinese Paper Journal, 2022, 37(3): 86-93.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纸和纸板 吸水性的测定(浸水法): GB/T 461.3—2005[S]. 北京: 中国质检出版社, 2005.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Determination of Water Absorption of Paper and Board (Immersion Method): GB/T 461.3-2005[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2005.
- [11] 赵玉梅,张博,刘美琴,等. 接触角法研究氨基甲酸酯基/脲键对聚酯型聚氨酯附着牢度的影响[J]. 高分子通报, 2024, 37(2): 245-256.
ZHAO Y M, ZHANG B, LIU M Q, et al. Study on the Effect of Urethane/Urea on the Adhesion Fastness of Polyester Polyurethane by Contact Angle[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2024, 37(2): 245-256.
- [12] PARKER KELLY A, STEPHANIE R, KIMMEL BLAISE R, et al. Scanning Transmission Electron

- Microscopy in a Scanning Electron Microscope for the High-Throughput Imaging of Biological Assemblies[J]. *Biomacromolecules*, 2022, 23(8): 3235-3242.
- [13] NI Z Y, LU Q F, XU Y S, et al. Intensity Simulation of a Fourier Transform Infrared Spectrometer[J]. *Sensors*, 2020, 20(7): 1833.
- [14] LUCIA M L, ROMANG B. Signatures of Aromatic Carbons in the Infrared Absorption Spectra of Soils[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2022, 267(2): 120469.
- [15] YAO F L, XU P C, JIA H, et al. Thermogravimetric Analysis on a Resonant Microcantilever[J]. *Analytical Chemistry*, 2022, 94(26): 9380-9388.
- [16] 杨婷. 食品用塑料包装材料阻隔性检测标准概述[J]. *塑料包装*, 2018, 28(2): 28-31.
- YANG T. Summarization of the Testing Standards for the Barrier Property of Plastic Packaging Materials for Food[J]. *Plastics Packaging*, 2018, 28(2): 28-31.
- [17] GUSTAVO N C, ELIDDON B D R, CRISTINA R G F, et al. Using Carboxyl Groups to Improve the Compatibility of XNBR/Lignin Composites[J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(5): 4124-4137.
- [18] 刘容宏, 孙元浩, 刘芳. 镀铝薄膜正反面阻隔性能变化研究[J]. *绿色包装*, 2021(9): 22-25.
- LIU R H, SUN Y H, LIU F. Research on the Change of front and back Barrier Property of Plastic Film Deposited with Aluminium[J]. *Green Packaging*, 2021(9): 22-25.
- [19] FERREIRA A C S, AGUADO R, BERTOLO R, et al. Enhanced Water Absorption of Tissue Paper by Cross-Linking Cellulose with Poly(Vinyl Alcohol)[J]. *Paper Technology: The Official Journal of the Paper Industry Technical Association*, 2023, 64(1): 22-25.
- [20] DELPOUVE N, STOCLRT G, SAITER A, et al. Water Barrier Properties in Biaxially Drawn Poly(Lactic Acid) Films[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2012, 116(15): 4615-4625.
- [21] MAHMOOD M K, NYAMUPANGEDENGU C, GOMES C, et al. Reducing Hydrophilic Characteristics of Kraft Paper Insulation by Reinforcing with Surface Modified Rutile-TiO₂ Nanoparticles[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 102237-102246.
- [22] 宋粉红, 姜瑜辉, 王志远, 等. CO₂液滴在粗糙固体壁面上的润湿特性[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(2): 161-169.
- SONG F H, JIANG Y H, WANG Z Y, et al. Wetting Characteristics of CO₂ Droplets on Rough Solid Wall[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2024, 48(2): 161-169.
- [23] SHI J Y, LI T T, WU C, et al. Paper-Based Material with Hydrophobic and Antimicrobial Properties: Advanced Packaging Materials for Food Applications[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2024, 23(3): e13373.
- [24] HAZAL Y D, PınAR T, ŞEYMA D. Polylactic Acid/Akermanite Biocomposite Films for Food Packaging Applications[J]. *Journal of Polymer Research*, 2024, 31(7): 195.
- [25] 宋艳, 杨晓涵, 林肯, 等. 含 P/N/Si 木质素基阻燃剂的制备及其阻燃聚乳酸[J]. *高分子材料科学与工程*, 2024, 40(3): 12-22.
- SONG Y, YANG X H, LIN K, et al. Preparation of P/N/Si Lignin-Based Flame Retardants and Their Flame-Retardant Polylactic Acid[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2024, 40(3): 12-22.
- [26] 张帆, 徐哲. 连续碳纤维3D打印的选择性增强路径规划方法[J]. *数字制造科学*, 2024, 22(1): 77-82.
- ZHANG F, XU Z. Selective Enhanced Path Planning Method for Continuous Carbon Fiber 3D Printing[J]. *Digital Manufacturing Science*, 2024, 22(1): 77-82.
- [27] ZHANG C, WU W, HU H B, et al. Effect of Multidimensional Filler Hybridization on the Mechanical Properties of Thermoplastic Polyurethane Composites Prepared by Selective Laser Sintering[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, 140(28): 54041.
- [28] LIU H Z, ZHANG J W. Toughening Modification of Poly (Lactic Acid) via Melt Blending[J]. *ACS Symposium Series*, 2012, 1105: 27-46.
- [29] 郭风, 刘容宏, 吴艳凤. 不同温湿度下几种软包装膜力学性能的研究[J]. *中国塑料*, 2019, 33(3): 87-92.
- GUO F, LIU R H, WU Y F. Study on Mechanical Properties of Several Flexible Packaging Films at Different Temperature and Humidity[J]. *China Plastics*, 2019, 33(3): 87-92.
- [30] RODNEY C. Effect of Irrigation Method on Essential Oil Yield and Rate of Oil Evaporation in Mint Grown under Controlled Condition1[J]. *HortScience*, 1977, 12(6): 563-565.
- [31] 陆一菲, 张慧娟, 王思文, 等. 不同气调包装对薄荷贮藏品质的影响及薄荷保鲜呼吸速率模型的建立[J].

- 食品工业科技, 2024, 45(9): 11-25.
- LU Y F, ZHANG H J, WANG S W, et al. Effects of Different Air Conditioning Packages on Storage Quality of Mint and Establishment of Respiration Rate Model of Mint Preservation[J]. Food Industry Science and Technology, 2024, 45(9): 11-25.
- [32] 张金凤, 王海旭, 张雅娜, 等. 虾青素-脱脂豆粕蛋白膜在番茄保鲜中的应用研究[J]. 发酵科技通讯, 2023, 52(4): 205-211.
- ZHANG J F, WANG H X, ZHANG Y N, et al. Application of Astaxanthin and Defatted Soybean Meal Protein Membrane in Tomato Preservation[J]. Fermentation Technology Bulletin, 2023, 52(4): 205-211.
- [33] 李国梁, 高永新, 罗学义. 元帅系苹果成龄园品种换优及树形重构改造试验[J]. 西北园艺, 2023, 2: 36-38.
- LI G L, GAO Y X, LUO X Y. Experimental Study on Variety Improvement and Tree Shape Reconstruction in the Mature Apple Orchard of Marshalland System[J]. Northwest Horticulture, 2023, 2: 36-38.
- [34] ROHINI J, SURYAWANSHI Y, BEDMUTHA Y, et al. Mint Leaves: Dried, Fresh, and Spoiled Dataset for Condition Analysis and Machine Learning Applications[J]. Data in Brief, 2023, 51: 109717.
- [35] 陈晓思, 梁洁, 林婧, 等. 薄荷的化学成分、药理作用和质量标志物预测研究概况[J]. 中华中医药学刊, 2021, 39(3): 213-217.
- CHEN X S, LIANG J, LIN J, et al. Prediction of Chemical Constituents, Pharmacological Effects and Quality Markers of Peppermint[J]. Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine, 2021, 39(3): 213-217.