

基于聚乳酸和纳米纤维素的微纳复合膜微包装的 保鲜机理研究

黎海凌, 彭国兴, 郭艳平, 高艳飞, 高志强*

(中山火炬职业技术学院 包装设计学院, 广东 中山 528436)

摘要: **目的** 开发和评估一种基于聚乳酸 (PLA) 和纳米纤维素 (NFC) 的微纳复合膜包装材料, 以提高果蔬保鲜效果, 并减小对环境的影响。**方法** 使用聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 薄膜替代果蔬进行定量化测试, 通过改变 NFC (质量分数为 0.5%) 与不同浓度、粒径 PLA 微粒的混合液喷涂次数, 研究它对 PET 薄膜氧气透过率、水蒸气透过率和辐射散热效果的影响。**结果** NFC (质量分数为 0.5%) 喷涂 5 次时, 复合膜的氧气和水蒸气透过率最低; 纤维素中加入适中浓度和粒径 (如 30 μm) 的 PLA 微粒能够增强氧气阻隔性能, 降低 PET 薄膜的水蒸气透过率; 5 次喷涂为平衡点, 过多喷涂, 其阻湿性能反而下降; NFC 和 PLA 微粒的添加使得 PET 薄膜具有一定的辐射散热效果。**结论** 适当的 NFC 和 PLA 微粒浓度、粒径, 以及喷涂次数可显著提高复合膜的性能, 该微纳复合膜通过提升纤维素膜均匀性增强阻氧、阻湿性能, 具有潜在的辐射降温作用, 为果蔬保鲜微包装材料的开发提供了策略。

关键词: 聚乳酸; 纳米纤维素; 微纳复合膜; 微包装; 氧气透过率; 水蒸气透过率; 辐射散热

中图分类号: TB383

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)05-0035-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.05.004

Preservation Mechanism of Micro-nano Composite Micro-packaging Based on Polylactic Acid and Nanofibrillated Cellulose

LI Hailing, PENG Guoxing, GUO Yanping, GAO Yanfei, GAO Zhiqiang*

(College of Packaging Design, Zhongshan Torch Polytechnic, Guangdong Zhongshan 528436, China)

ABSTRACT: The work aims to develop and evaluate a micro-nano composite film packaging material based on polylactic acid (PLA) and nanofibrillated cellulose (NFC) to enhance the preservation effect of fruits and vegetables and reduce the environmental impact. Polyethylene terephthalate (PET) films were used to replace fruits and vegetables for quantitative testing. The effects of the spraying times of a mixture of 0.5% NFC and PLA micro-particles of different concentrations and particle sizes on the oxygen permeability, water vapor permeability and radiation heat dissipation effect of PET films were studied. The results showed at 5 times of spraying of 0.5% NFC, the oxygen and water vapor permeability of the composite film were the lowest. Adding PLA micro-particles of moderate concentration and particle size (such as 30 μm) to cellulose could enhance the oxygen barrier performance and reduce the water vapor permeability of PET films. Five times of spraying were the balance point, and excessive spraying would instead reduce the moisture resistance. The addition of NFC and PLA micro-particles gave PET films a certain radiation heat dissipation effect. In conclusion, NFC and PLA micro-particles of appropriate concentrations, particle sizes and spray times can significantly

收稿日期: 2024-10-30

基金项目: 广东省教育厅普通高校科研项目 (2022ZDZX4115, 2022KQNCX256, 2023ZDZX2091); 广东省普通高校创新团队项目 (2023KCXDT084); 中山市第二批社会公益与基础研究项目 (2023B2022)

*通信作者

improve the performance of the composite film. This micro-nano composite film enhances the oxygen and moisture barrier performance by improving the uniformity of the cellulose film and has a potential radiation cooling effect, providing a strategy for the development of micro-packaging materials for fruit and vegetable preservation.

KEY WORDS: polylactic acid; nanofibrillated cellulose; micro-nano composite film; micro-packaging; oxygen permeability; water vapor permeability; radiation heat dissipation

在当今全球环境污染和资源枯竭的严峻挑战下,开发可持续性材料已成为科学研究的热点。特别是在包装材料领域,传统的石油基塑料由于难以降解而引发的环境问题日益凸显,寻找环境友好型的替代品显得尤为迫切。生物基材料以其可再生、生物降解性及生物相容性等优势,成为解决这一问题的理想选择。聚乳酸(PLA)和纳米纤维素(NFC)作为代表性的生物基材料,因独特的物理化学性质被广泛用于开发新型的包装材料^[1-7]。PLA作为一种生物可降解的聚酯,来源于可再生的生物质资源,如玉米淀粉和甘蔗,具有优良的加工性能和生物相容性;而NFC作为纤维素的纳米尺度形态,不仅具有高力学强度和高透明度,还具备优异的气体阻隔性能,是提升包装材料性能的理想选择^[8-14]。多项研究^[15-17]证明NFC可以延长新鲜果蔬的保质期,也有研究证实了NFC膜具有氧气阻隔性。然而,单一材料往往难以满足复杂应用环境的需求。虽然PLA具有良好的生物降解性,但其气体阻隔性能较弱,限制了它在保鲜包装中的应用^[9]。NFC虽具备高气体阻隔性,但在实际应用中往往需要与其他材料复合以获得更全面的性能^[18]。因此,将PLA与NFC结合制备成微纳复合膜,不仅能够发挥2种材料的优势,还可以通过材料间的协同效应,实现对包装材料性能全面提升^[19]。

本研究提出一种基于微纳材料的微包装技术,通过在产品表面涂覆功能性微纳材料,赋予其温湿度响应、气体感应、阻隔性调整等功能,以实现对产品个体所处环境的精确控制,增强对产品的保护作用。基于该理念,本研究采用PLA和NFC的混合液喷涂于新鲜果蔬产品表面制成微纳复合膜微包装。为便于量化研究,本研究以PET薄膜为基材替代果蔬,喷涂不同浓度、粒径的PLA微粒与NFC混合悬浮液,测试薄膜透气、透氧、辐射散热等多方面性能的影响和变化,微纳复合薄膜对果蔬保鲜的作用机理,以探索实现果蔬微包装。通过本文研究,期望为生物基微包装材料的开发提供新的策略和方法,推动包装材料行业向更加绿色、低碳的方向发展。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料:纳米纤维素(NFC),TEMPO氧化法制备,表面为羟基和羧基,闪思科技;聚乳酸(PLA),

微球,直径为10、30、60、100 μm,温州品卓生物科技有限公司;PET薄膜,厚度为180 μm,电晕覆膜,塑恒塑膜。

主要仪器:锂电池131马克笔喷枪(后称“喷枪”),喷嘴口径为0.3 mm,宜迈文具;氧气透过率测试系统(C230H),济南兰光机电技术有限公司;水蒸气透过率检测系统(C360H),济南兰光机电技术有限公司;紫外-可见-近红外分光光度计(UV-3600i Plus),岛津公司;场发射环境扫描电子显微镜(Quanta 400 FEG),美国FEI公司;红外热像仪(FLIR ONE),Teledyne FLIR;烘箱(DHG-9030),上海一恒科学仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 样品制备

将质量分数为0.5%的NFC分别与不同粒径、浓度的PLA微粒搅拌5~10 min,并超声混合5 min,形成不同的喷涂方案。使用喷枪在PET薄膜表面进行喷涂,喷涂后自然干燥。制订好的喷涂方案定义如下。S0:无喷涂;S1:质量分数0.5%的NFC;S2:NFC(0.5%)+PLA(0.05%)微球(10 μm);S3:NFC(0.5%)+PLA(0.05%)微球(30 μm);S4:NFC(0.5%)+PLA(0.05%)微球(60 μm);S5:NFC(0.5%)+PLA(0.05%)微球(100 μm);S6:NFC(0.5%)+PLA(0.01%)微球(30 μm);S7:NFC(0.5%)+PLA(0.01%)微球(60 μm)。S1*1为S1方案喷涂1次,S3*3为S3方案喷涂3次,依此类推。

1.2.2 PET膜性能测试

1.2.2.1 氧气透过率测试

参考GB/T 19789—2021《包装材料 塑料薄膜和薄片氧气透过性试验 库仑计检测法》,进行3次平行测定后取其平均值。

1.2.2.2 湿度透过率测试

参考GB/T 1037—2021《塑料薄膜与薄片水蒸气透过性能测定 杯式增重与减重法》,进行3次平行测定后取其平均值。

1.2.2.3 红外辐射实验

将PET膜制成3 cm×6 cm×12 cm的盒子后喷涂最优微纳涂层方案,空白盒子作为对比样。将样品置于50℃烘箱,30 min后取出放回室温环境(28℃),使用红外热成像仪拍摄温度变化至温度稳定,记录样品每隔1 min的实时温度,考察喷涂对PET薄膜的辐

射散热效果。

1.2.2.4 光谱吸收率测试

将 PET 膜覆在 120 g 纸张基底后制成 1 cm×1 cm 片状样品,喷涂最优微纳涂层方案,空白片作为对比样,置于紫外-可见-近红外分光光度计测试 300~2 500 nm 范围的光谱吸收率。

1.2.2.5 果蔬保鲜验证

使用新采摘芒果喷涂最优微纳涂层方案与无涂层对比,验证保鲜效果。

1.2.3 误差传递计算

透氧测试和透水蒸气测试方法中,误差发生因素包括测试环境温度、气体压强、喷涂操作误差和 PET 均匀性差异,如表 1 所示。基于设备参数和测试结果赋予相应的误差比例得出误差传递公式,见式(1)。

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2} \quad (1)$$

式中: T 为测试环境温度, K; P 为气体压强, kPa; C 为喷涂操作误差, g/(cm²·次); U 为 PET 均匀性差异, μm。

表 1 参数和不确定性
Tab.1 Parameters and uncertainties

编号	参数	不确定性(±)	参考来源
1	测试环境温度 T	0.15	温度计说明
2	气体压强 P	0.05%	设备参数
3	喷涂操作误差 C	0.25%	喷涂测试
4	PET 均匀性差异 U	0.05%	厚度测试

2 结果与分析

2.1 PET 表面微纳复合膜层的氧气透过率测试

2.1.1 NFC 的喷涂次数对复合膜氧气透过率的影响

为验证 NFC 用量对成膜效果的影响,将 S1 喷涂于 PET 薄膜表面,喷涂次数分别为 0、1、3、5、7、9,每次喷涂之间自然干燥,喷涂后分别对薄膜进行氧气透过率测试,结果如图 1 所示。由图 1 可知,质量分数为 0.5%的 NFC 的喷涂次数对复合膜氧气透过率有一定影响,当喷涂次数为 1、3、5 时,复合膜的氧气透过率逐渐降低,表明随着喷涂次数的增加,NFC 在 PET 薄膜表面形成的复合膜层更加致密,阻碍了氧气的透过;当喷涂次数增加到 7 时,氧气透过率反而上升,这可能是由于过多的喷涂次数使喷涂层干燥较慢,受“咖啡环效应”影响,干燥过程中表面张力牵拉导致 NFC 团聚,纤维素膜层出现不均匀性,使得氧气更容易透过。因此,当质量分数为 0.5%的 NFC 的喷涂次数为 5 时,样品的氧气透过率最低。

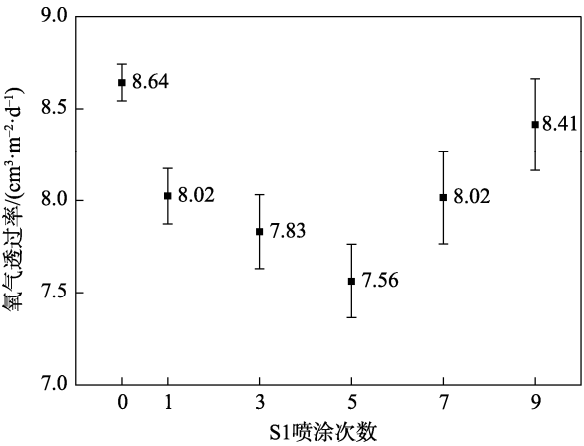


图 1 质量分数为 0.5%的 NFC 的喷涂次数对复合膜氧气透过率的影响
Fig.1 Effect of spraying times of 0.5% NFC on oxygen permeability of composite films

2.1.2 PLA 粒径对微纳复合膜氧气透过率的影响

为验证 PLA 微粒粒径对 NFC 成膜效果的影响,分别将 S2、S3、S4、S5 在 PET 薄膜上喷涂 5 次,喷涂后分别对薄膜进行氧气透过率测试,结果如图 2 所示。由图 2 可知,S2、S3、S4 氧气透过率均低于没有加入微粒的 S1,这是因为在 NFC 干燥成膜过程中,引入的 PLA 微粒作为锚点可以限制纤维素迁移,削弱“咖啡环效应”,增加纤维素成膜的均匀性,进而提升阻隔作用。但是由于锚点粒径的增加,同样质量浓度下粒径越大其颗粒数量越少,锚点分布越少,从而使锚定作用减弱;另外,微粒粒径的增加同样导致其自身吸附的 NFC 更多,且纤维素呈现立体分布,更加削弱 NFC 的成膜效果,这也是 S5 成膜后氧气透过率高于 S1 的原因。可见,不同 PLA 微粒粒径形成的复合膜层氧气透过率不同,本测试结论为 NFC 混入 30 μm 粒径的 PLA 微球有助于强化氧气阻隔作用。

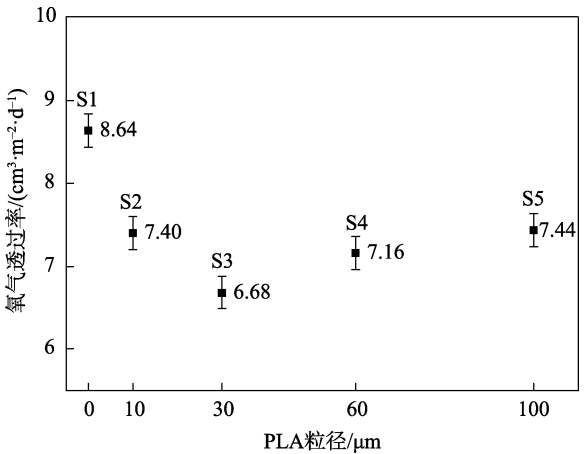


图 2 不同粒径 PLA 微粒对复合膜氧气透过率的影响
Fig.2 Effect of PLA particles with different particle sizes on oxygen permeability of composite films

2.1.3 PLA 质量浓度和喷涂次数对微纳复合膜氧气透过率的影响

PLA 微球参与 NFC 微纳复合膜制备过程中,影响其成膜效果的参数包括微球粒径、微球浓度、喷涂次数,为了进一步了解和验证微球质量浓度和喷涂次数的作用,将 S3、S6、S7 分别喷涂 1、5、9 次后测试氧气透过率,测试结果如图 3 所示。分析图 3 可得出以下结论。

1)不同 PLA 微球浓度的影响。从喷涂数据来看,微球的添加降低了氧气透过率,但是当 PLA 微球质量分数达到 0.1%时,氧气透过率提升,表明过高的 PLA 微球浓度可能吸附 NFC,导致膜层不均匀或形成缺陷。

2)喷涂次数的影响。从喷涂数据来看,喷涂 1 次和 5 次的氧气透过率较低,但喷涂 9 次的氧气透过率提升,表明在高浓度 PLA 微球的情况下,过多的喷涂次数可能会导致膜层性能下降。

3)在寻找最优的氧气阻隔性能过程中,需要考虑 PLA 微球的浓度。根据实验结果,样品 S3 在喷涂 5 次时可以达到最佳的氧气阻隔性能。

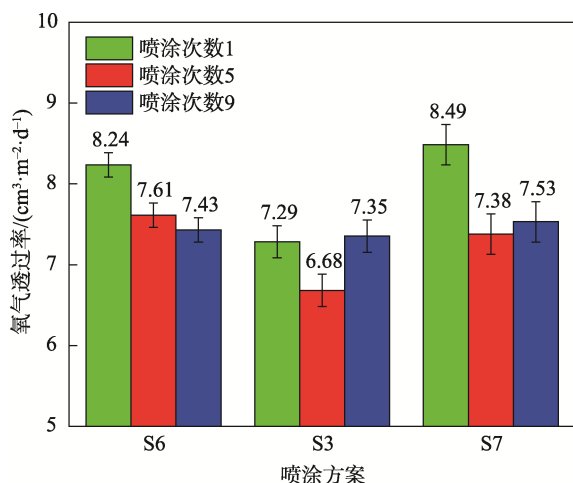


图3 PLA 微粒浓度及喷涂次数对复合膜氧气透过率的影响

Fig.3 Effect of PLA particle concentration and spraying times on oxygen permeability of composite films

2.2 PET 表面微纳复合膜层的水蒸气透过率测试

2.2.1 NFC的喷涂次数对复合膜水蒸气透过率的影响

将 S1 喷涂于 PET 薄膜,喷涂次数分别为 1、3、5、7、9,喷涂后分别对薄膜进行水蒸气透过率测试,结果如图 4 所示。由图 4 可知,随着喷涂次数的增加,水蒸气透过率整体呈现下降趋势,表明喷涂 NFC 可以提高 PET 薄膜的阻湿性能;在喷涂次数从 1 增加到 3 的过程中,阻湿性能的提升最为明显;从 3 次喷涂增加到 5 次喷涂,水蒸气透过率的降低幅度减小,

表明此时可能已经接近材料阻湿性能的饱和点;喷涂 7、9 次时水蒸气透过率的轻微上升可能是喷涂层的不均匀性或其他缺陷导致。由此可知,喷涂 NFC 可以有效降低 PET 薄膜的水蒸气透过率,喷涂次数的增加对阻湿性能的提升有积极作用,但存在一个饱和点,超过这个点后,额外的喷涂可能不会带来显著的性能提升,甚至可能由于涂层不均匀导致性能略有下降,即 5 次喷涂可能是一个较好的平衡点,既能有效降低水蒸气透过率,又避免了因涂层过厚而导致潜在问题。

水蒸气透过率曲线与氧气透过率曲线都呈现先下降后升高的趋势,但是回升程度显著不同。根据相关研究^[20],NFC 膜除了对水蒸气具有阻隔作用,还有一定的吸附作用。一般情况下,纤维素纳米材料的水蒸气吸收量随着相对湿度的增加而增加,随着温度的提升反而下降。本研究中伴随喷涂次数的增加,虽然成膜均匀性下降,但是由于 NFC 对水蒸气的吸附作用,其水蒸气透过率并没有显著提升。纤维素对于水蒸气的吸附无疑对延长果蔬保鲜期限起到积极的作用。

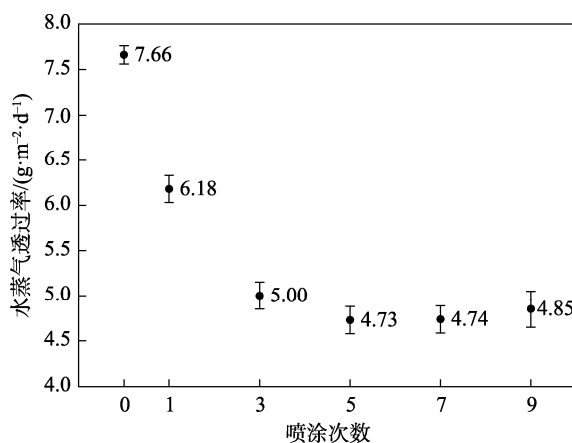


图4 NFC 喷涂次数对复合膜水蒸气透过率的影响

Fig.4 Effect of spraying times of NFC on water vapor permeability of composite films

2.2.2 微纳复合膜对水蒸气透过率的影响

将样品 S1、S3 分别在 PET 薄膜上喷涂 1、5、9 次,喷涂后分别对薄膜进行水蒸气透过率测试,结果如图 5 所示。由图 5 可知,S3 样品喷涂后的水蒸气阻隔效果均优于 S1 样品,喷涂 5 次的 S3 依然体现出更好的阻隔性,即同时添加质量分数 0.5% NFC 与 0.05% PLA 微球 (30 μm) 形成的微纳复合膜比单独喷涂质量分数 0.5% NFC 的薄膜水蒸气阻隔性更强。

2.3 微纳复合膜层的辐射散热效果分析

辐射制冷是通过热辐射实现降温的被动制冷技术,大气在可见光波段是透明的,但在红外波段并非透明,发射率在此范围内的物体能够在无能耗条件下实现低于环境温度的制冷效果。一般物体温度高于环

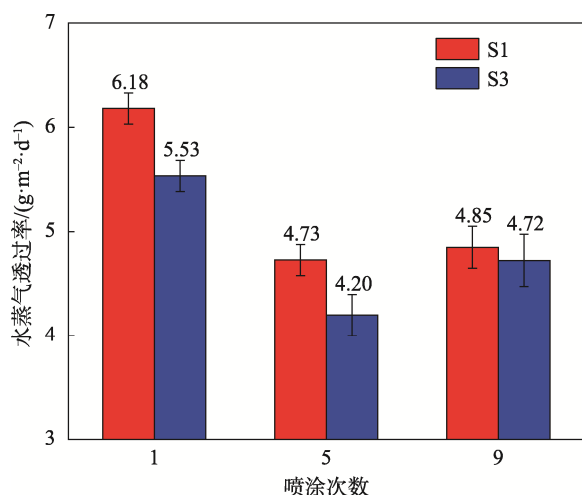


图 5 不同喷涂次数对复合膜水蒸气透过率的影响

Fig.5 Effect of different spraying times on water vapor permeability of composite films

环境温度称为辐射散热, 低于环境温度称为辐射制冷。想要实现辐射制冷/降温, 需要在太阳光谱范围内减少材料对太阳光的吸收功率, 增加对外辐射功率, 具体为在 $0.3\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 范围内光谱的吸收率尽量低, 在 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ 波段大气窗口范围内发射率尽量高。

根据文献资料, 影响辐射散热的主要因素包括原材料、结构和光学性能, 纤维素和纤维素制品已被证实具有辐射散热/制冷的特点^[21-22], 有研究通过增加空心微球来增强辐射制冷效果^[23]。目前已有包装材料辐射制冷的研究^[24], 但尚未见到辐射散热/制冷在果蔬保鲜方面的探索和研究。本研究通过 PET 盒子验证微纳复合膜层是否具有促进降温的效果。取出样品 PET 盒时, 箱体样本温度均高于环境温度, 此时发生的主要是对流换热。1 min 后开始测量, 发现喷涂微纳复合膜层的箱体温度低于无喷涂盒体的温度, 此时箱体散热包括对流散热和辐射散热。室温条件下, 温度不断降低至稳定, 此时喷涂微纳复合膜层的箱体温度依然低于无喷涂盒体温度, 且低于环境温度, 处于辐射散热阶段。

箱体降温曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 自烘箱中取出喷涂 5 次 S3 涂层的 PET 盒子降温速率更快, 这是因为其表层结构添加了 NFC 和 PLA 微粒, 可能改变了 PET 薄膜的吸收和辐射特性。

为确认微纳复合膜层辐射散热特征, 进行光谱反射率测试。一般来说, 对于非透明物体: 发射率=100%-(反射率+透射率)^[25]。经过反射率和透射率测试并经归一化处理, 获得吸收率测试结果如图 7 所示, 在 $300\sim 2\ 500\ \text{nm}$ 范围内综合评估复合膜层吸收率更低, 因此认为微纳复合膜层的结构符合强化辐射散热的特征。但是, 微纳复合膜层在 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ 范围内的发射率以及辐射制冷/散热作用对于果蔬保鲜的贡献有多大, 尚需进一步研究。

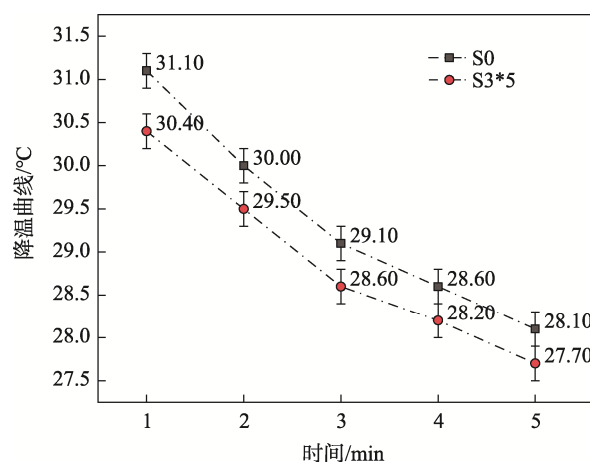


图 6 箱体降温曲线

Fig.6 Cooling curve of box body

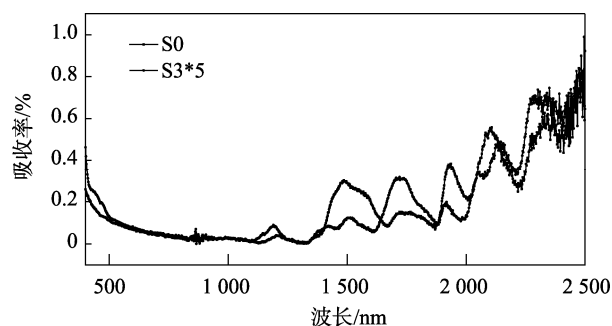


图 7 光谱吸收率曲线

Fig.7 Spectral absorptivity curve

2.4 芒果保鲜实验

为进一步验证本研究所开发的微纳复合膜对水果的保鲜效果, 使用新采摘的芒果进行保鲜测试, 分别使用无喷涂 S0 及 S3 喷涂 5 次作为对比样, 室温放置 10 d, 拍摄表观效果如图 8 所示。由图 8 可知, 未经处理的芒果表现出明显的干瘪, 颜色暗沉, 经过喷涂的芒果维持较好的表面效果。



图 8 芒果保鲜对比测试

Fig.8 Comparative test of mango preservation

3 结语

通过系统实验设计,探索了 PLA 和 NFC 混合液喷涂于 PET 薄膜制成的微纳复合膜在果蔬保鲜中的应用潜力。为了便于表征,研究使用 PET 替代果蔬进行量化测试,重点考察了 NFC 和 PLA 微粒的浓度、粒径及喷涂次数对 PET 薄膜氧气透过率、水蒸气透过率和辐射散热效果的影响。研究结果表明,当 NFC 质量分数为 0.5%、PLA 微粒质量分数为 0.05%、粒径为 30 μm 、喷涂次数为 5 次时,复合膜展现出最优的阻氧、阻湿性能,并具有潜在的辐射降温作用。NFC 保鲜机理在于通过 PLA 微球提升纤维素膜的均匀性,从而增强复合膜的阻氧、阻湿性能。未来的研究可进一步探索更多种类的生物基材料及功能化元素,以推动包装材料行业向更加绿色、低碳的方向发展。

参考文献:

- [1] 刘佳欣,赵晓颖,翁云宣.生物基可降解聚合物食品包装材料发展及应用综述[J].包装工程,2023,44(13): 19-26.
LIU J X, ZHAO X Y, WENG Y X. Development and Application of Biobased Materials for Food Packaging [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(13): 19-26.
- [2] 江洪,李晓南,高倩,等.生物基材料研发态势分析[J].中国生物工程杂志,2024,44(1): 142-151.
JIANG H, LI X N, GAO Q, et al. Analysis of Bio-Based Materials Development and R & D Trend[J]. China Biotechnology, 2024, 44(1): 142-151.
- [3] 潘洵,肖乃玉,胡心宽,等.生物基包装材料的制备及其在果蔬保鲜中应用[J].包装工程,2023,44(23): 84-93.
PAN X, XIAO N Y, HU X K, et al. Preparation of Bio-based Packaging Materials and Their Application in Fruit and Vegetable Preservation[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(23): 84-93.
- [4] 安艳霞,刘欣,雷永伟,等.生物基活性食品包装材料的研究进展[J].食品安全质量检测学报,2023,14(18): 190-200.
AN Y X, LIU X, LEI Y W, et al. Advance in Bio-Based Active Food Packaging Materials[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2023, 14(18): 190-200.
- [5] 孙乐乐,杨进.生物基活性包装材料的研究进展[J].中国造纸,2022,41(1): 99-105.
SUN L L, YANG J. Progress in Research on Biologically Active Packaging Materials[J]. China Pulp & Paper, 2022, 41(1): 99-105.
- [6] 朱迎澳,陈倩,孔保华,等.生物基纳米复合食品包装材料的抗菌性研究进展[J].中国食品学报,2024,24(1): 466-474.
ZHU Y A, CHEN Q, KONG B H, et al. Research Progress on Antibacterial Properties of Bio-Based Nanocomposite Food Packaging Materials[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(1): 466-474.
- [7] 张群.淀粉基生物可降解材料制备技术研究[J].食品科学与生物技术,2022,41(11): 112.
ZHANG Q. Research on the Preparation Technology of Starch-Based Biodegradable Materials[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(11): 112.
- [8] ZHAO X Y, CORNISH K, VODOVOTZ Y. Narrowing the Gap for Bioplastic Use in Food Packaging: An Update[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(8): 4712-4732.
- [9] MARANO S, LAUDADIO E, MINNELLI C, et al. Tailoring the Barrier Properties of PLA: A State-of-the-Art Review for Food Packaging Applications[J]. Polymers, 2022, 14(8): 1626.
- [10] NAZRIN A, SAPUAN S M, ZUHRI M M, et al. Nanocellulose Reinforced Thermoplastic Starch (TPS), Polylactic Acid (PLA), and Polybutylene Succinate (PBS) for Food Packaging Applications[J]. Frontiers in Chemistry, 2020, 8: 213.
- [11] 赵吉丽.聚乳酸(PLA)可生物降解薄膜的制备与性质研究[D].长春:吉林大学,2020: 8.
ZHAO J L. Preparation and Properties of Polylactic Acid (PLA) Biodegradable Film[D]. Changchun: Jilin University, 2020: 8.
- [12] MOLDOVAN A, CUC S, PRODAN D, et al. Development and Characterization of Polylactic Acid (PLA)-Based Nanocomposites Used for Food Packaging[J]. Polymers, 2023, 15(13): 2855.
- [13] PLATNIEKS O, SEREDA A, GAIDUKOV S, et al. Adding Value to Poly(Butylene Succinate) and Nanofibrillated Cellulose-Based Sustainable Nanocomposites by Applying Masterbatch Process[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 169: 113669.
- [14] MA M, XU L, QIAO L L, et al. Nanofibrillated Cellulose/MgO@rGO Composite Films with Highly Anisotropic Thermal Conductivity and Electrical Insulation[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 392: 123714.
- [15] AMOROSO L, FRANCE K J D, MILZ C I. Sustainable Cellulose Nanofiber Films from Carrot Pomace as Sprayable Coatings for Food Packaging Applications[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2022, 10:

- 342-352.
- [16] 郭玉花, 黄震, 滕立军, 等. 新型纳米活性果蔬气调包装保鲜膜的研制[J]. 包装工程, 2008, 29(3): 47-48.
GUO Y H, HUANG Z, TENG L J, et al. Preparation of New Nano-Active Fresh-Keeping Film for Modified Atmosphere Packaging[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3): 47-48.
- [17] 那广宁, 纪海鹏, 李航, 等. 菠萝叶纤维素膜对青枣和鲜切菠萝的保鲜效果研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(17): 6-11.
NA G N, JI H P, LI H, et al. Study on the Fresh-Keeping Effect of Pineapple Leaf Cellulose Membrane on Green Jujube and Fresh-Cut Pineapple[J]. Food Research and Development, 2019, 40(17): 6-11.
- [18] 唐淑玮. 无机材料增强的纳米纤维素基阻隔材料的构建及其性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
TANG S W. Preparation and Characteristics of Nanocellulose-Based Barrier Materials Reinforced with Inorganic Materials[D]. Gungzhou: South China University of Technology, 2023.
- [19] GOND R K, GUPTA M K. Development and Characterization of PLA-Based Green Nanocomposite Films for Sustainable Packaging Applications[J]. Journal of Natural Fibers, 2022, 19(17): 15738-15750.
- [20] GARG M, APOSTOLOPOULOU-KALKAVOURA V, LINARES M, et al. Moisture Uptake in Nanocellulose: The Effects of Relative Humidity, Temperature and Degree of Crystallinity[J]. Cellulose, 2021, 28(14): 9007-9021.
- [21] CHEN Y P, DANG B K, FU J Z, et al. Cellulose-Based Hybrid Structural Material for Radiative Cooling[J]. Nano Letters, 2021, 21(1): 397-404.
- [22] TIAN Y P, SHAO H, LIU X J, et al. Superhydrophobic and Recyclable Cellulose-Fiber-Based Composites for High-Efficiency Passive Radiative Cooling[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(19): 22521-22530.
- [23] CHEN M J, LI S, PANG D, et al. Numerically Enhancing Daytime Radiative Cooling Performance of Random Dielectric Microsphere Coatings by Hollow Structures[J]. Journal of Photonics for Energy, 2021, 11(4): 042108.
- [24] 张帆. 多功能淀粉基特种纸材料的制备及性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
ZHANG F. Study on Preparation and Properties of Multifunctional Starch-Based Special Paper Materials[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.
- [25] 李世民. 基于微纳结构的辐射控温薄膜制备及物性研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2021.
LI S M. Preparation and Physical Properties of Radiation Temperature-Controlled Thin Films Based on Micro-Nano Structure[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021.