

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.06.003

柑橘保鲜的PVAL/CA/TP薄膜的制备及性能

吕维思, 郭柯赞, 黄飞鸿, 李凤红

(沈阳工业大学石油化工学院, 辽宁辽阳 111003)

摘要:以聚乙烯醇(PVAL)为成膜基材,添加不同配比的柠檬酸(CA)和茶多酚(TP),采用流延法制备PVAL/CA/TP复合薄膜。研究了CA的添加量对PVAL基薄膜力学性能、阻隔性能、耐水性能等的影响,并用所制备的复合薄膜进行柑橘的保鲜测试。结果表明,随着CA含量不断增加,复合薄膜的拉伸强度呈现先升高后降低的趋势。当CA含量(PVAL质量的百分数)为6%时,拉伸强度达到最大值为17.54 MPa,较未添加CA/TP的薄膜提高了28.22%。随着CA含量增加至8%,薄膜的拉伸强度降低,而断裂伸长率继续上升至最大值为655.27%。薄膜在CA含量为6%时水蒸气透过系数(WVP)值达到最低,为0.97 (g·mm)/(m²·h·kPa),表现出最佳的气体阻隔性,同时吸水率也达到最低,为10.27%,因此CA含量为6%时薄膜的综合性能最佳。后选取CA含量为6%时的薄膜进行柑橘保鲜测试,与未包装薄膜和市售聚乙烯、聚氯乙烯薄膜包装的柑橘相比,经PVAL/CA/TP薄膜包装的柑橘表现出较好的保鲜效果,柑橘的失重率上升趋势最为缓慢,在贮藏14 d后仍未出现任何腐烂现象,这保持了柑橘的商品价值,为食品保鲜薄膜领域提供一定的参考价值。

关键词: 聚乙烯醇; 柠檬酸; 茶多酚; 耐水性; 复合薄膜

中图分类号: TQ325.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)06-0014-06

Preparation and properties of PVAL/CA/TP films for citrus preservation

LYU Weisi, GUO Keyun, HUANG Feihong, LI Fenghong

(School of Petrochemical Engineering, Shenyang University of Technology, Liaoyang 111003, China)

Abstract: Polyvinyl alcohol (PVAL) was used as the film-forming substrate, citric acid (CA) and tea polyphenols (TP) were added in different proportions, and the PVAL/CA/TP composite film was prepared by casting method. The effects of the CA contents on the mechanical properties, barrier properties, water resistance, etc. of the PVAL-based film were studied, and the prepared composite film was used to perform citrus preservation tests. The research results show that as the CA content continues to increase, the tensile strength of the composite film first increases and then decreases. When the CA content (percentage of PVAL mass) is 6%, the tensile strength reaches the maximum value of 17.54 MPa, which is 28.22% higher than that of the film without CA/TP compound. As the CA content increases to 8%, the tensile strength of the film decreases, while the elongation at break continues to rise to a maximum value of 655.27%. When the CA content of the film is 6%, the water vapor permeability coefficient (WVP) value of the film reaches the lowest, which is 0.97 (g·mm)/(m²·h·kPa), showing the best gas barrier properties, at the same time, the water absorption also reaches the lowest, which is 10.27%. Therefore, when the CA content is 6%, the overall performances of the film are the best. Finally, films with a CA content of 6% were selected for citrus preservation tests. Compared with unpackaged citrus and citrus packaged in commercially available PE and PVC films, citrus packaged in PVAL/CA/TP films shows better preservation effects, which has the slowest upward trend for weight loss rate and has not shown any signs of rot after 14 days of storage. The research maintains the commercial value of citrus and provides a certain reference value for the field of food preservation films.

Keywords: polyvinyl alcohol; citric acid; tea polyphenols; water resistance; composite film

基金项目: 辽宁省高等学校基本科研重点项目(LZGD2017040)

通信作者: 李凤红, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为生物基功能高分子材料的制备及应用

收稿日期: 2024-04-07

引用格式: 吕维思, 郭柯赞, 黄飞鸿, 等. 柑橘保鲜的PVAL/CA/TP薄膜的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(6): 14-19.

LYU Weisi, GUO Keyun, HUANG Feihong, et al. Preparation and properties of PVAL/CA/TP films for citrus preservation[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(6): 14-19.

聚乙烯醇(PVAL)基薄膜因具有优异的成膜性能、生物相容性和生物降解性而广泛应用于各个领域^[1-3]。然而,为了提高其力学性能、阻隔性能和耐水性,使其能够应用于食品包装等特定领域,有必要加入专用添加剂。近年来,柠檬酸(CA)和茶多酚(TP)等天然化合物因其在复合薄膜中作为添加剂具有较高的潜力而受到关注。CA是一种在柑橘类水果中大量存在的弱有机酸,具有多种功能特性,包括抗菌、抗氧化和pH调节作用^[4]。另外,CA的特殊官能团能与PVAL发生交联反应,可以提高薄膜的耐水性、力学性能、阻隔性能等。此外,CA本身被公认为天然抗菌剂^[5-6]。TP来源于茶叶,以其强大的抗氧化和抗菌活性而闻名,不仅可以提升薄膜的保鲜效果,还能抑制包装膜本身的劣化^[7-9]。将具备抗菌性的CA和具有抗氧化的TP协同使用,在赋予薄膜优异的抗菌性和抗氧化性的同时抑制薄膜的劣化,这种绿色的改性方法在食品包装领域有望取得良好的应用。通过将这些天然化合物掺入PVAL薄膜中,可以提高薄膜整体性能,特别是在提高强度、对气体和液体的阻隔性能以及对微生物生长的抵抗力等方面。

笔者旨在通过流延法制备含有CA和TP的PVAL基复合薄膜。通过调整复合添加剂的比例,研究了这些添加剂对薄膜力学性能、阻隔性能和耐水性的影响。此外,使用开发的复合薄膜进行了柑橘保鲜测试,以评估它们在延长柑橘类水果保质期方面的有效性。通过这项研究,笔者开发了一种环保且力学性能较高、阻隔性能较好的包装材料,以保存易腐烂的果蔬类货物,特别是柑橘类水果。天然添加剂的使用不仅增强了薄膜的功能特性,而且符合食品行业对可持续和环保包装解决方案日益增长的需求。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PVAL:1799型,中国石化上海石油化工股份有限公司;

CA:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

TP:南通奥凯生物技术开发有限公司;

无水乙醇:分析纯,辽宁泉瑞试剂有限公司;

无水氯化钙:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

氯化钠:分析纯,天津大茂化学试剂厂;

氢氧化钠:分析纯,天津市瑞金特化学品有限公司;

聚己内酯基增塑剂(GCL):实验室自制^[10]。

1.2 仪器及设备

电子分析天平:JA3003N,上海佑科仪器仪表有限公司;

真空干燥箱:DZF-6050,上海精宏实验设备有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:TENSOR II,德国布鲁克公司;

微机控制电子万能试验机:CMT-6104,深圳市新三思材料检验有限公司;

紫外-可见分光光度计:Lambda 25,美国PE公司;

热封机:YNL-200,浙江永康市工贸有限公司。

1.3 试样制备

称取一定量的PVAL溶于蒸馏水中,置于90℃的恒温油浴锅中恒速搅拌至完全溶解,得到质量分数为5%的PVAL水溶液,加入增塑剂GCL(PVAL总质量的50%),继续恒温搅拌得到改性PVAL溶液。然后加入不同含量CA(CA含量为PVAL总质量的0%,2%,4%,6%,8%,分别记为CA_{0%},CA_{2%},CA_{4%},CA_{6%},CA_{8%},CA含量为0%时,TP的含量亦为0%),继续搅拌2h,再加入TP(PVAL总质量的1%),继续搅拌至完全混合后得到不同CA含量的PVAL/CA/TP成膜液。将成膜液静置一段时间,待冷却至室温后倒入直径为20cm的圆形玻璃皿中,置于真空干燥箱中干燥12h后取出冷却揭膜,得到不同CA含量的PVAL/CA/TP交联薄膜。

1.4 测试与表征

(1)FTIR测试:采用FTIR仪在扫描波数4000~400cm⁻¹下测试薄膜的FTIR谱图。

(2)拉伸性能测试:将薄膜裁剪成150mm×20mm的长方形样条,参照GB/T 1040.3-2006,在100mm/min的拉伸速率下测定样条的拉伸强度和断裂伸长率,每组样品测3次,结果取其平均值。

(3)不透明度测试:采用紫外-可见分光光度计测定薄膜在600nm处所对应的吸光度,并计算薄膜的不透明度^[11],每组样品测3次,结果取其平均值。

(4)水蒸气透过系数(WVP)测试:选取直径为40mm的干燥称量瓶,向瓶底放入3g无水CaCl₂,用薄膜密封瓶口,置于盛有饱和NaCl溶液的干燥器中,

记录称量瓶质量的增加量,每组薄膜测量3次,计算结果取其平均值^[12-14]。

(5)吸水性测试^[15]:将薄膜裁成80 mm×30 mm置于50℃的干燥箱中干燥24 h,取出后称重记为 m_1 ;将干燥的薄膜平铺于表面皿上,置于装有蒸馏水的干燥器中,密封24 h后取出称重记为 m_2 ,薄膜吸水率(W_A)计算见式(1);每组薄膜测3次,结果取其平均值。

$$W_A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

(6)柑橘保鲜测试:挑选颜色一致、大小均匀、成熟度相近,并且均未虫害的新鲜柑橘,将新鲜柑橘分别分装于市售薄膜和自制PVAL薄膜,使用热封机封合;将装好的柑橘置于室温环境中贮藏,以未包装的柑橘为对照组,标记为CK,观察薄膜对柑橘的保鲜效果;每组3个平行样,每12 h观察一次,使用数码相机拍照记录。

(7)柑橘失重率测定:采用差量称重法测定失重率^[16],计算方法见式(2)。

$$R_w = \frac{m_0 - m_i}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R_w 为失重率,单位%; m_0 为贮藏前果实质量,单位g; m_i 为贮藏后果实质量,单位g。

(8)柑橘腐烂率测定:将柑橘的腐烂程度分为5个等级,腐烂率的计算方法见式(3)^[17]。

$$D = \frac{L_i \times n}{L \times N} \times 100\% \quad (3)$$

式中: D 为腐烂率; L_i 为腐烂等级; n 为该等级果数; L 为最高腐烂等级; N 为总果数。

腐烂等级:0级,无腐烂;1级,腐烂面积<10%;2级,11%<腐烂面积<30%;3级,31%<腐烂面积<50%;4级,腐烂面积>51%。

2 结果与讨论

2.1 FTIR 分析

CA, TP, PVAL 及不同 CA 含量的 PVAL/CA/TP 薄膜的 FTIR 谱图如图 1 所示。在 CA 的 FTIR 谱图中,可以观察到 $3\ 378\text{ cm}^{-1}$ 左右的宽峰为—OH 的伸缩振动峰, $1\ 721\text{ cm}^{-1}$ 处为羰基的特征吸收峰^[18], $1\ 754\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 684\text{ cm}^{-1}$ 处为羧酸的 C—O 拉伸振动峰。TP 的谱图显示在 $1\ 514\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 607\text{ cm}^{-1}$ 处为苯环骨架的 C=C 振动, $1\ 230\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 686\text{ cm}^{-1}$ 处为 C=O 拉伸振动, $3\ 228\text{ cm}^{-1}$ 处为—OH 拉伸振动^[19]。加入 TP 后,薄膜原在 $3\ 273\text{ cm}^{-1}$ 处的峰(—OH 拉伸)

向低波数移动,表明 TP 和 PVAL 分子之间存在相互作用,这与张礼华^[20]研究的 PVAL 与 TP 之间相互作用的结果相一致。另外没有检测到新的特征峰,说明 TP 与 PVAL, CA 没有参与化学反应,仅为物理混合。另外,随着 CA 含量的增加, $1\ 715\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰逐渐增强, $3\ 647\sim 2\ 993\text{ cm}^{-1}$ 处的—OH 宽度带减弱,表明 CA 与 PVAL 发生了交联。

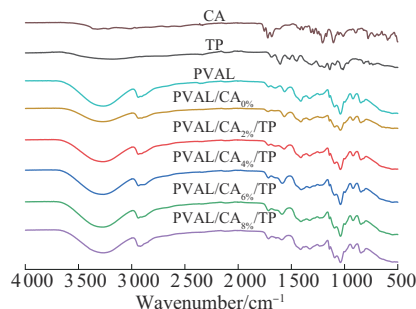


图1 CA, TP, PVAL 及不同 CA 含量的 PVAL/CA/TP 薄膜的 FTIR 谱图
Fig. 1 FTIR spectra of CA, TP, PVAL and PVAL/CA/TP films with different CA contents

2.2 力学性能分析

图 2 显示了不同 CA 含量的 PVAL/CA/TP 薄膜的力学性能。由图 2 观察到,随着 CA 含量的增加,薄膜的拉伸强度和断裂伸长率都显著提高。特别是当 CA 含量为 6% 时,拉伸强度达到最大值 17.54 MPa,比 PVAL/CA₀% 提高了 28.22%,此时薄膜的断裂伸长率为 592.04%。CA 和 TP 的添加提高了薄膜的拉伸强度,因为 CA 与 PVAL 形成交联网络,加强了聚合物链的交联,而 TP 中的多羟基化合物与 PVAL 形成氢键,增加了分子间的作用力,从而增大了薄膜的拉伸强度。然而,当 CA 含量超过 6% 时,拉伸强度开始下降,而断裂伸长率则持续上升至最大值,为 655.27%。这可能是因为过多的柠檬酸导

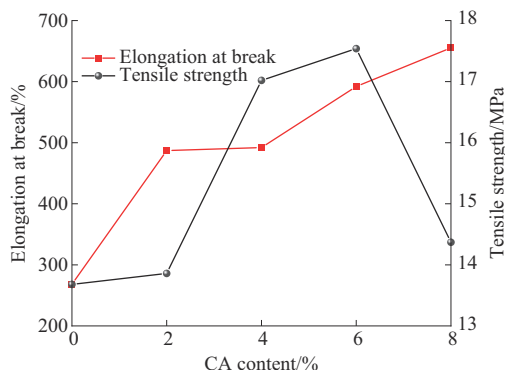


图2 不同 CA 含量的 PVAL/CA/TP 薄膜的力学性能
Fig. 2 Mechanical properties of PVAL/CA/TP films with different CA contents

致薄膜结构变得疏松,从而影响拉伸强度。综合来看,当CA含量为6%时,薄膜的综合力学性能达到最佳。

2.3 不透明度分析

图3为CA含量对PVAL/CA/TP薄膜的不透明度的影响。从图3可看出,随着CA含量的增加,薄膜的不透明度逐渐上升。当CA含量为0%时,不透明度为 0.42 mm^{-1} ;当CA含量增至2%时,不透明度上升到 0.53 mm^{-1} ;而当CA含量为8%时,薄膜的不透明度值到最大值,为 1.38 mm^{-1} 。可能是因为CA促进了聚合物链间的交联,导致薄膜的致密性增加。随着交联程度的提高,光线在材料内部的散射和吸收增加,使得薄膜变得更不透明。总体来看,不透明度在初期增加缓慢,而在CA含量接近8%时,急剧上升。

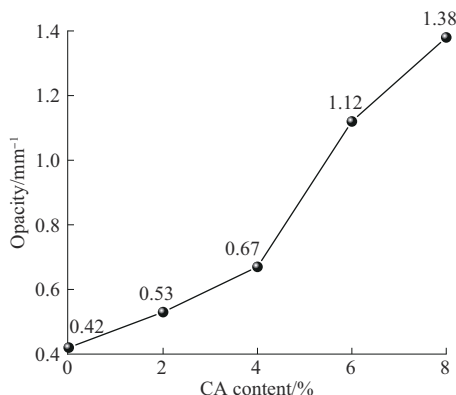


图3 CA含量对PVAL/CA/TP薄膜不透明度的影响

Fig. 3 Effect of CA content on opacity of PVAL/CA/TP films

2.4 WVP分析

图4为不同CA含量下PVAL/CA/TP薄膜WVP的变化。由图4看出,随着CA含量的增加,薄膜呈现下降后略微上升的趋势,未添加CA/TP的PVAL

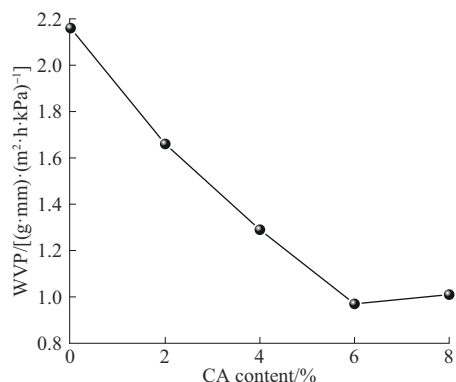


图4 CA含量对PVAL/CA/TP薄膜WVP的影响

Fig. 4 Effect of CA content on water vapor permeability (WVP) of PVAL/CA/TP films

薄膜WVP值为 $2.16 (\text{g}\cdot\text{mm})/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{kPa})$,而当CA含量达到6%时,WVP值降至最低为 $0.97 (\text{g}\cdot\text{mm})/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{kPa})$,与未添加CA/TP的薄膜相比,WVP显著降低了55.09%。这一变化归因于CA作为交联剂,增加了PVAL基质内的交联密度,使得薄膜结构更加紧密,从而使水分子更难渗透。此外,TP可能与PVAL之间形成氢键等相互作用,减小了复合膜分子间的间隙,进一步降低了PVAL薄膜WVP。然而,当CA含量超过6%后,WVP又略有上升,这可能是由于过度交联导致薄膜变得更脆或相分离,从而产生微孔并增加渗透性。

2.5 吸水性分析

图5为PVAL/PCL/CA/TP薄膜的吸水性随CA含量增加的变化趋势。从图5可以观察到,随着CA含量的增加,薄膜吸水率呈现出先降低后略微上升的趋势。在CA含量为0%时,吸水性最高,为20.47%。当CA含量增加到6%时,薄膜吸水率降至最低点,为10.27%,相较于对照组的20.47%,降低了49.83%。随后,当CA含量继续增加到8%时,吸水性略微上升。吸水率下降可能是由于CA增加了薄膜的交联密度,从而减少了薄膜中水分子的通过。此外,加入TP后,其含有疏水性基团苯环,可能增强了薄膜的疏水性,从而使得薄膜的亲水性下降。然而,随后吸水率的略微上升可能因为交联网络过于密集,导致薄膜结构中产生微小的空隙,这些空隙可以存储水分子,因此吸水率出现了上升趋势。

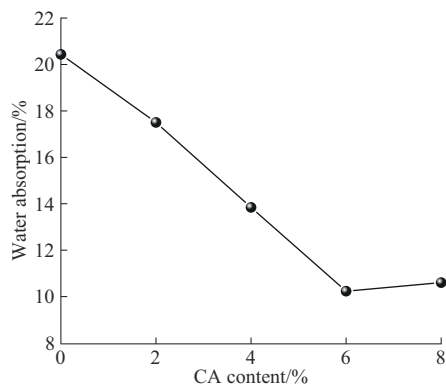


图5 CA含量对PVAL/CA/TP薄膜吸水性的影响

Fig. 5 Effect of CA content on water absorption performances of PVAL/CA/TP films

2.6 保鲜测试

综上所述,在CA含量为6%时,薄膜的综合性能最佳,选取PVAL/CA_{6%}/TP薄膜进行柑橘的保鲜测试。

2.6.1 薄膜对柑橘贮藏期保鲜效果

CK、聚乙烯(PE)、聚氯乙烯(PVC)及PVAL/CA/TP薄膜对柑橘的保鲜效果如图6所示。由图6可看出,不同包装膜对柑橘感官和品质产生了不同的影响。未包装及采用市售保鲜膜(PE,PVC)包装的柑橘在第8 d霉变腐败,到第14 d出现大面积腐烂,其中PVC包装的柑橘在第14 d完全腐败。而使用PVAL/CA/TP薄膜包装的柑橘保鲜效果较好,在第14 d时,柑橘仍然保持鲜艳的颜色,果实状态良好,没有腐烂迹象。这主要归因于PVAL/CA/TP薄膜的水蒸气渗透性较低,可以减少柑橘水分的蒸发,并且CA的加入在一定程度上抑制了柑橘表面细菌的繁殖。此外,TP的抗氧化特性也对防腐保鲜起到了作用,因此柑橘仍然保持较为新鲜。综合分析表明,添加复合抗菌剂的薄膜对柑橘的保鲜效果良好,有效延长了柑橘的贮藏时间,具有较好的商业应用前景。

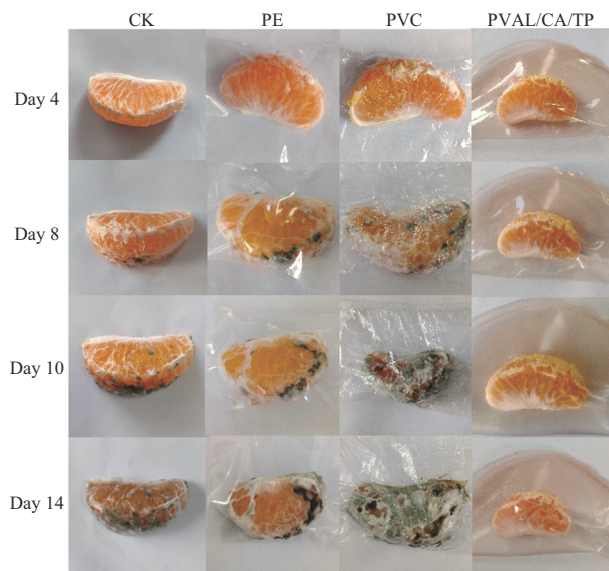


图6 不同薄膜对柑橘的保鲜效果

Fig. 6 Preservation efficacy of various films on citrus

2.6.2 薄膜对柑橘贮藏期失重率的影响

柑橘水分含量较高,如果保鲜不当,易失水造成果实皱缩。图7为不同薄膜对柑橘失重率的影响。由图7看出,随着柑橘贮藏时间的延长,所有处理组的失重率呈上升趋势。这是由于柑橘中含有丰富的水分,呼吸和蒸腾作用造成了水分流失,大量失水后,柑橘会局部软化,加剧酶的水解,导致柑橘细胞衰老加速。CK组柑橘的失重率明显高于采用薄膜包装的柑橘,这是因为CK组的柑橘自身水分极易流失到空气中,新陈代谢加快导致失重率增

加。市售保鲜膜(PE,PVC)包装的柑橘的失重率低于CK组,表现出一定的保鲜效果。而采用PVAL/CA/TP薄膜包装的柑橘失重率上升趋势最为缓慢,在贮藏10 d内表现出良好的保鲜效果,且明显优于市售保鲜膜。贮藏后期,PVAL/CA/TP薄膜在12 d后失重率略有增加,但仍低于其他处理组。这是由于该薄膜具有较高的水蒸气阻隔性,减缓了柑橘中水分的蒸发,降低了柑橘的呼吸作用、失水和氧化,从而降低了柑橘的失重率,有利于保持柑橘的感官品质和营养价值。

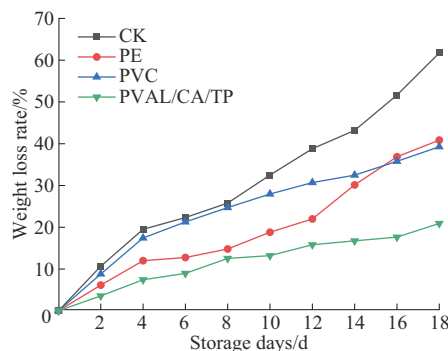


图7 不同薄膜对贮藏期柑橘失重率的影响

Fig. 7 Influences of different films on weight loss rate of citrus during storage period

2.6.3 薄膜对柑橘贮藏期腐烂率的影响

柑橘类水果的腐烂除了受其本身组成、性质及生理变化的影响外,还受到环境的影响。图8显示了不同薄膜对柑橘腐烂率的影响。由图8可以看出,随着贮藏时间的延长,柑橘的腐烂率逐渐增加。CK组的柑橘从第6 d开始出现菌斑腐败,第10天后大面积腐烂。市售保鲜膜(PE,PVC)包装的柑橘从第4 d就出现菌斑开始腐败,第10 d后完全腐烂。然而,用PVAL/CA/TP薄膜包装的柑橘在第18 d几乎没有腐烂迹象,说明添加了CA和TP后,有效提

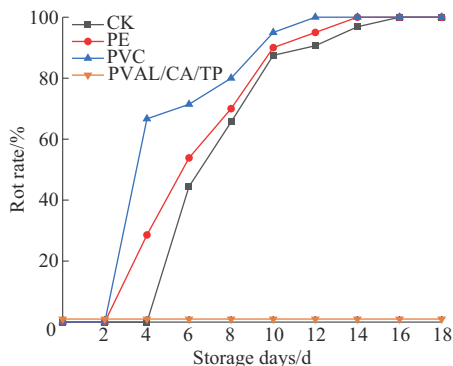


图8 不同薄膜对贮藏期柑橘腐烂率的影响

Fig. 8 Influences of different films on rot rate of citrus during storage period

高了薄膜的防霉抗菌能力,增强了薄膜的水蒸气阻隔性,抑制了病原微生物的生长,降低了柑橘的腐烂率,对柑橘有着较好的防腐保鲜功效。综上分析可知,使用复合抗菌剂制备的薄膜对柑橘的保鲜效果明显优于CK组和市售保鲜膜,有效延长了柑橘的货架期。此外,薄膜无毒且可生物降解,因此在食品包装安全和环保领域具有极大的发展前景。

3 结论

(1)力学分析表明,随着CA含量增加,PVAL/CA/TP薄膜的拉伸强度和断裂伸长率显著提高。当CA含量为6%时,薄膜拉伸强度达到最大值。

(2)不透明度分析表明,随着CA含量增加,薄膜的不透明度逐渐上升。当CA含量为8%时,薄膜的不透明度达到最大值,可能是因为CA促进了聚合物链间的交联,增加了薄膜的致密性。

(3)WVP分析表明,随着CA含量增加,薄膜WVP呈现下降后略微上升的趋势。CA作为交联剂增加了PVAL基质内的交联密度,使得薄膜结构更加紧密,降低了水分子的渗透。

(4)吸水性分析表明,随着CA含量增加,薄膜吸水率先降低后略微上升。加入TP后可能增强了薄膜的疏水性,导致吸水性的下降,但随后吸水率略微上升可能是因为交联过度导致薄膜结构中产生微小的空隙,存储的水分子增加。

(5)在柑橘的保鲜测试中发现,柑橘水分含量高、易失水导致果实皱缩,各处理组失重率和腐烂率均随贮藏时间增加而上升。CK组和市售保鲜膜(PE,PVC)包装的柑橘失重率高,腐烂速度较快。使用PVAL/CA/TP复合薄膜包装的柑橘,表现出最佳的保鲜效果,在18 d内几乎无腐烂迹象,表现出优异的防腐抗菌效果。添加CA和TP有效提高了薄膜的防霉抗菌能力,延长了柑橘的货架期。薄膜无毒且可生物降解,具有广阔的发展前景。

参考文献

- [1] SONG W, ZHAO X, JIN Z, et al. Poly (vinyl alcohol) for multi-functionalized corrosion protection of metals: A review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 394. DOI:10.1016/j.jclepro.2023.136390.
- [2] 吕维思,李凤红,王哲,等.交联改性聚乙烯醇功能膜研究进展[J].*工程塑料应用*, 2023, 51(2):165-170.
LYU Weisi, LI Fenghong, WANG Zhe, et al. Research progress of crosslinked modified polyvinyl alcohol based functional membrane [J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(2):165-170.
- [3] 李鹏珍,李凤红,师岩,等.聚乙烯醇发泡材料研究进展[J].*工程塑料应用*, 2021, 49(2):172-176.
LI Pengzhen, LI Fenghong, SHI Yan, et al. Research progress of polyvinyl alcohol foaming materials[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(2):172-176.
- [4] 夏飞,张处旭,武子宁,等.柠檬酸对食用菌腐败菌的抑制作用及其作用机制[J].*陕西科技大学学报*, 2023, 41(2):40-45.
XIA Fei, ZHANG Chuchu, WU Zining, et al. Antibacterial effect and mechanism of citric acid on spoilage bacteria of edible mushroom[J]. *Journal of Shaanxi University of Science*, 2023, 41(2):40-45.
- [5] ZHANG M, JIA H, WANG B, et al. A prospective review on the research progress of citric acid modified starch[J]. *Foods*, 2023, 12(3). DOI:10.3390/foods12030458.
- [6] 黄思琦,赵瑞新,申和峰,等.柠檬酸对淀粉/聚乙烯醇复合膜性能的影响[J].*塑料*, 2023, 52(6):95-99.
HUANG Siqi, ZHAO Ruixin, SHEN Hefeng, et al. Preparation and property of modified corn and polyvinyl alcohol composite film[J]. *Plastics*, 2023, 52(6):95-99.
- [7] 梁杰,赵晓旭,刘涛,等.茶多酚-壳聚糖复合膜的制备及保鲜效果研究[J].*热带作物学报*, 2022, 43(6):1 267-1 279.
LIANG Jie, ZHAO Xiaoxu, LIU Tao, et al. Preparation and fresh-keeping effect of tea polyphenol-chitosan composite film[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2022, 43(6):1 267-1 279.
- [8] ZHANG W, JIANG H, RHIM J W, et al. Tea polyphenols (TP): A promising natural additive for the manufacture of multifunctional active food packaging films[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 63(2):288-301.
- [9] 王晓晶.茶多酚保鲜液对圣女果保鲜效果的研究[J].*中国食品添加剂*, 2023, 34(3):188-195.
WANG Xiaojing. Preservation effect of tea polyphenols on cherry tomatoes[J]. *China Food Additives*, 2023, 34(3):188-195.
- [10] 李凤红,师岩,陈延明,等.一种可降解复合增塑剂改性的PVA及其制备方法:CN111303570A[P]. 2020-06-19.
LI Fenghong, SHI Yan, CHEN Yanming, et al. A degradable composite plasticizer modified PVA and its preparation method: CN111303570A[P]. 2020-06-19.
- [11] GAO H, YANG H. Preparation and characterization of cinnamaldehyde/polyvinyl alcohol/silver nanoparticles ternary composite films[J]. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 2021, 26(1):24-36.
- [12] JIN Q, YU H, ZHANG Y, et al. Influence of urea on polarization property and mechanical properties of polyvinyl alcohol films for the polarizers[J]. *Journal of Polymer Research*, 2022, 29(11). DOI: 10.1007/s10965-022-03321-x.
- [13] YAO Y, ZHANG Z, WANG K, et al. Effects of plasticizing on mechanical and viscous characteristics of poly (vinyl alcohol): A comparative study between glycerol and diethanolamine[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2023, 308(10). DOI: 10.1002/mame.202300090.