

新材料技术

不同抗氧化剂对聚乙烯醇复合膜性能的影响

李倩文, 王智慧, 周硕威, 张楚娟, 江晓琪
(安徽农业大学 轻纺工程与艺术学院, 合肥 230036)

摘要: **目的** 利用不同水溶性及脂溶性抗氧化剂对聚乙烯醇 (PVA) 进行改性, 以期在改善复合膜综合性能的基础上, 重点提升其抗氧化能力。**方法** 以茶多酚、柠檬酸、BHT 和维生素 E 为变量, 甘油/聚乙烯醇为基底, 研究不同水溶性及脂溶性抗氧化剂对复合膜形貌、力学性能、透光性、耐水性能及抗氧化能力的影响。**结果** 加入适量的抗氧化剂后, 薄膜各项性能均有所增强。其中, 茶多酚/聚乙烯醇复合膜的力学性能最优, 茶多酚 (1.5%) /PVA 复合膜的拉伸强度可达 47.85 MPa, 断裂伸长率为 375.69%。该复合膜显著提高了紫外线的吸收率, 同时 73.93% 的自由基清除率为研究薄膜中最高。**结论** 采用茶多酚改性聚乙烯醇, 不仅可提升复合膜的包装强度, 增强其耐水性能, 更能增强抗氧化能力, 为食品保鲜提供了良好思路。

关键词: 聚乙烯醇; 茶多酚; 抗氧化剂; 力学性能; 自由基清除率

中图分类号: TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)11-0104-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.11.016

Effects of Different Antioxidants on Properties of PVA Composite Films

LI Qian-wen, WANG Zhi-hui, ZHOU Shuo-wei, ZHANG Chu-juan, JIANG Xiao-qi

(School of Light-textile Engineering and Art, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

ABSTRACT: The work aims to modify the polyvinyl alcohol (PVA) with different water-soluble and fat-soluble antioxidants in order to improve the antioxidant properties of the composite film on the basis of enhancing its comprehensive performance. With tea polyphenols, citric acid, BHT and vitamin E as variables and glycerol/polyvinyl alcohol as basis, the effects of different water-soluble and fat-soluble antioxidants on the morphology, mechanical properties, light transmittance, water resistance and antioxidant capacity of the composite film were studied. The properties of the films were enhanced by adding proper amount of antioxidant. The mechanical properties of tea polyphenols/polyvinyl alcohol composite film were the best. The tensile strength of tea polyphenols (1.5%)/PVA composite film could reach 47.85 MPa and the breaking elongation rate was up to 375.69%. The composite film could significantly improve the UV absorption rate, and the free radical scavenging rate of 73.93% was the highest among all the studied films. Using tea polyphenol to modify polyvinyl alcohol can not only improve the packaging strength of composite film and enhance its water resistance, but also strengthen its antioxidant and antibacterial properties, providing a good idea for food preservation.

KEY WORDS: polyvinyl alcohol; tea polyphenols; antioxidants; mechanical properties; free radical scavenging rate

收稿日期: 2019-09-19

基金项目: 安徽省质量工程项目 (2018jyxm0480); 安徽省教育厅自然科学重点项目 (KJ2018A0159); 安徽省自然科学基金 (1808085QB41)

作者简介: 李倩文 (1987—), 博士, 安徽农业大学讲师, 主要研究方向为纳米复合材料。

氧化是食品问题中较为常见的一类,会使营养价值降低、风味丧失甚至变质,影响消费者的食用和身体健康。针对氧化问题,不仅需要食品自身进行严格把关,包装材料也会产生巨大影响。聚乙烯醇(PVA)薄膜因具有优异的成膜效果及氧气、氮气阻隔性,可实现自然降解等特性,被公认为理想的新兴绿色环保材料^[2-4]。由于聚乙烯醇膜存在抗氧化效果不佳的缺点,因此研究者将具有抗氧化效果的天然或人工提取物加入食品包装中以改善其抗氧化能力^[5-7]。随着食品添加剂安全问题的日益突出,通过在包装材料中添加或覆盖试剂等手段,制备释放类的活性包装^[8],进而抑制食品氧化、抗菌防腐的效果是研究人员关注的重点^[9-11]。

茶多酚(TP)是从茶叶中提纯得到,大多是绿茶的提取物,质量分数为 99% 的茶多酚易溶于水、乙醇,无毒无害且具有很强的抗氧化能力,加入 PVA 基材中可增强薄膜的性能^[12-13]。柠檬酸是三羧酸类化合物,单独使用时,抗氧化效果不明显;与聚乙烯醇分子可以发生酯化及交联反应,可增强 PVA 薄膜的抗氧化性能,同时 PVA 的水解性能也会得到提高^[14]。2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚(BHT)作为一种油溶性抗氧化剂,充当添加剂加入食品中时,能使食物的口味更加持久,因此,在塑料薄膜中加入 BHT 能够增强食品保鲜效果^[15]。维生素 E(VE)是一种脂溶性维生素,安全、无毒,且是一种强抗氧化剂,在医药、保健食品领域有广泛的应用^[16]。

文中通过将不同的抗氧化剂与高阻隔性包装材料配合使用,期望能够有效阻隔氧气、清除自由基。分别将 TP、柠檬酸、BHT 和 VE 作为抗氧化剂加入 PVA 制备复合膜,通过研究其形貌、力学性能、透光性、耐水及抗氧化性能,以进一步提高 PVA 膜的综合性能,为基于 PVA 包装材料的研发提供基础数据。

1 实验

1.1 试剂与仪器

主要试剂:聚乙烯醇(PVA)、丙三醇、无水乙醇、茶多酚(TP)、柠檬酸、2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚(BHT),皆为分析纯;维生素 E(VE),市售胶囊。

主要仪器:GZX-9070MBE 电热鼓风干燥箱,UV/V-16/18 型紫外可见分光光度计,HWS24 数显恒温水浴锅,YP1201N 电子天平,XLW/PC 智能电子拉力试验机,ZH-3 型台式测厚仪,扫描电镜(Hitachi S-4800)。

1.2 膜的制备

1.2.1 聚乙烯醇膜的制备

将 3.5 g 的聚乙烯醇均匀溶解于含 0.2 g 丙三醇的

40 mL 去离子水中,转速为 300 r/min,升温至 80 ℃,加入 10 mL 无水乙醇,反应 2 h;随后置于数控超声波清洗器中脱除气泡,在膜液清澈无泡沫状态下倒入直径为 15 cm 的培养皿中,在 60 ℃ 的恒温干燥箱放置 4 h,每隔 0.5 h 观察 1 次成形情况。常温冷却后揭下膜片于密封袋内避光保存。

1.2.2 不同抗氧化剂复合膜的制备

采用相同的成膜工艺,将不同质量分数的 TP、柠檬酸、BHT 及 VE 分别加入基准配比的聚乙烯醇膜(3.5 g 聚乙烯醇/0.2 g 丙三醇/10 mL 无水乙醇/40 mL 去离子水)。其中 TP 质量分数为 0.5%,1%,1.5%,2%,柠檬酸质量分数为 1%,2%,3%,4%,BHT 质量分数为 0.1%,0.2%,0.3%,0.4%,VE 质量分数为 1%,3%,5%,7%。

1.3 膜的性能表征

1.3.1 力学性能

取长度为 6 cm、宽度为 1 cm 的薄膜样本,使用台式测厚仪测出薄膜厚度,设置拉伸速度为 100 mm/min,每组取 4 个样品,取其平均值^[17]。

1.3.2 光学性能

将样品裁剪为长为 4 cm、宽为 1 cm 的膜条,每组取 4 个样品,使用 UV/V-16/18 型紫外可见分光光度计在 650 nm 处测透光率。

1.3.3 耐水性能

将样品剪成 4 cm×4 cm 的正方块,每组取 4 个样品,放入 85 ℃ 烘箱烘至恒质量 m ,然后置于 20 ℃ 去离子水中 10 min。用滤纸吸干样品表面水分,质量为 m_1 ,计算吸水率^[18]。

$$\text{吸水率} = ((m_1 - m) / m) \times 100\%$$

1.3.4 抗氧化性能

采用 DPPH 自由基清除法测定薄膜的抗氧化能力,将薄膜切成 4 cm×4 cm 的样品置于 40 mL 去离子水中至薄膜完全溶解,待用。称取 0.0197 g 的 1,1-二苯基-2-苦肼基溶于 50 mL 的无水乙醇,制备出 DPPH 溶液,随后取 3 mL 于比色皿中,用紫外可见分光光度计测量 517 nm 处的吸光度值,之后将剩余 DPPH 液体密封避光保存。量取 4 mL 膜液和 1 mL DPPH 无水乙醇溶液,待混合均匀,避光反应 40 min 后,测量 517 nm 处混合液的吸光度^[19]。

2 结果与分析

2.1 形貌分析

纯 PVA 膜的扫描结果见图 1,可知,膜表面平整,且断面形态也相对均匀。在此基础上,研究了不同抗

氧化剂对 PVA 膜外观的影响,4 组薄膜表面及断裂面形貌见图 2—3。图 2a, 3a 为 TP/PVA 复合膜的表面积断面形貌,可以看出表面光滑,断面与对照组有细微差别,存在丝状物质,这可能由于 PVA 溶解还不够充分,处于无限溶胀状态,且在加入热稳定的茶多酚无水乙醇溶液后,产生了一些细丝,因此对薄膜的拉伸强度和断裂伸长率产生一定影响。由于柠檬酸在无水乙醇中溶解时会产生一定结晶,导致形成的膜液倒入培养皿时会悬浮在表面,进而在干燥后形成颗粒,使得柠檬酸/PVA 复合膜表面有一定凸起。断面处形成了与 TP 复合膜类似的丝状物,并存在部分翘曲,这可能是由于裁剪片材速度不够。BHT/PVA 复合膜表面的平滑度类似于纯 PVA 膜,内部有丝状物存在,从断裂处可以看出丝带分散广且均匀。VE/PVA 复合膜与前 3 组有较大差异,断面、表面凹凸不平,存在部分聚集。

2.2 力学性能分析

TP/PVA 复合膜的拉伸强度及断裂伸长率见图 4a。作为对照组,纯 PVA 膜的拉伸强度为 21.38 MPa,断裂伸长率为 139.1%。加入 0%~1.5% (质量分数) TP 后,复合膜的拉伸强度随着 TP 含量的增加明显升高,当 TP 质量分数为 1.5%时,复合膜拉伸强度达到最大值 47.85 MPa。不同抗氧化剂的分子结构式见图 5,加入 TP 后,TP 中的多羟基与 PVA 通过氢键相互作用,使 PVA 分子链更加紧密,增强其网络结构,进而提高复合膜的拉伸强度。当茶多酚质量分数>1.5%时,PVA 中羟基与茶多酚中多羟基的作用力增强,导致聚合物大分子间的相互作用力减弱,进而使复合膜的拉伸强度降低。复合膜的断裂伸长率由纯 PVA 膜的 139.1%不断上升,在 TP 质量分数为 2%时达到了 393.78%,这是由于 TP 与 PVA 之间的相互作用

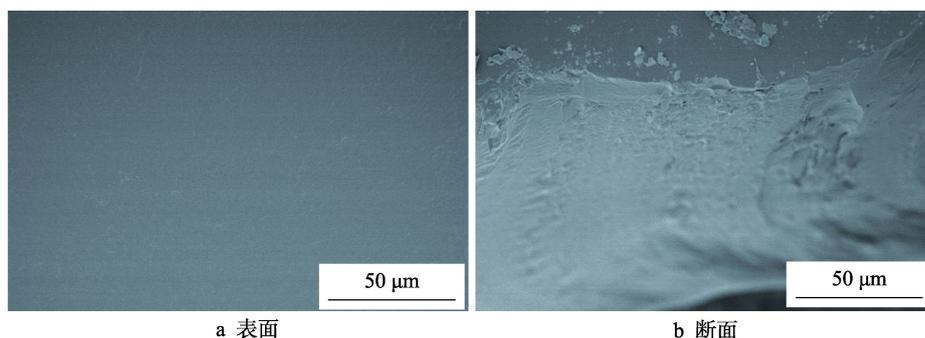


图 1 PVA 膜表面及断面形态

Fig.1 SEM of surface and cross section of PVA film

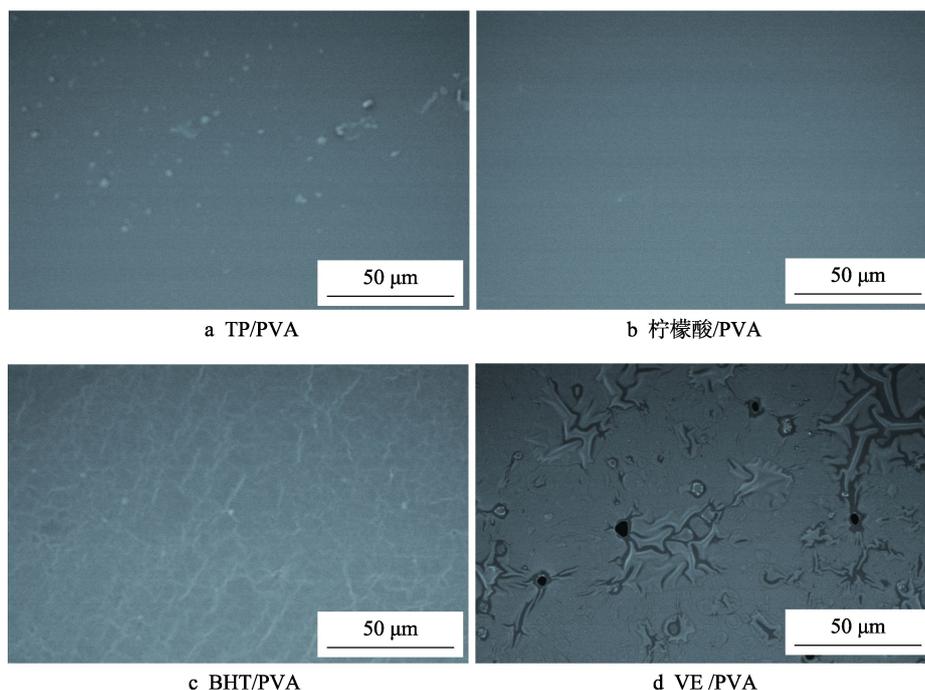


图 2 不同抗氧化剂复合膜的表面形态

Fig.2 Surface morphology of composite films with different antioxidants

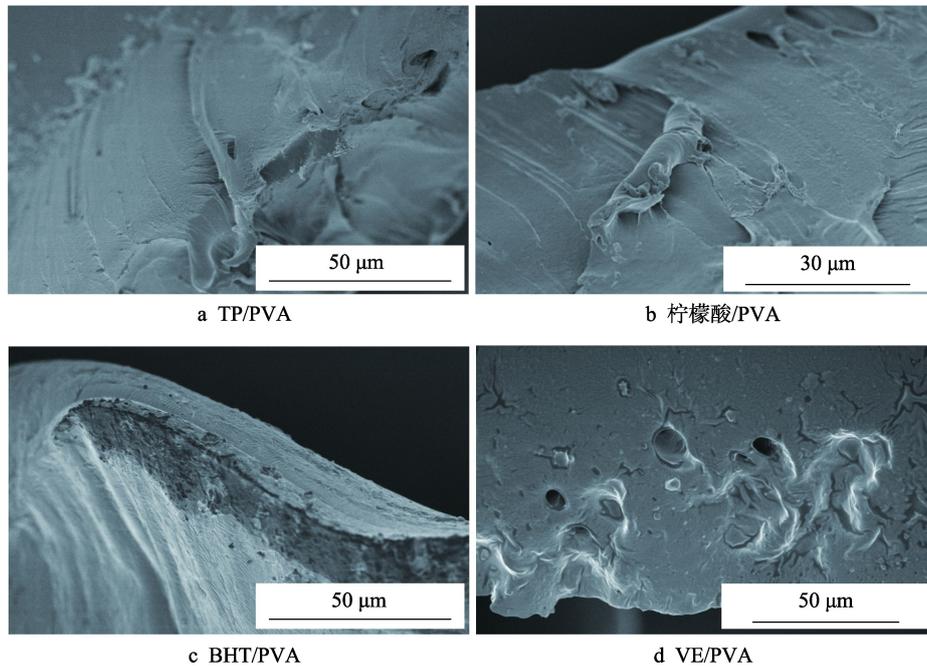


图 3 不同抗氧化剂复合膜的断面形态

Fig.3 Cross section morphology of composite films with different antioxidants

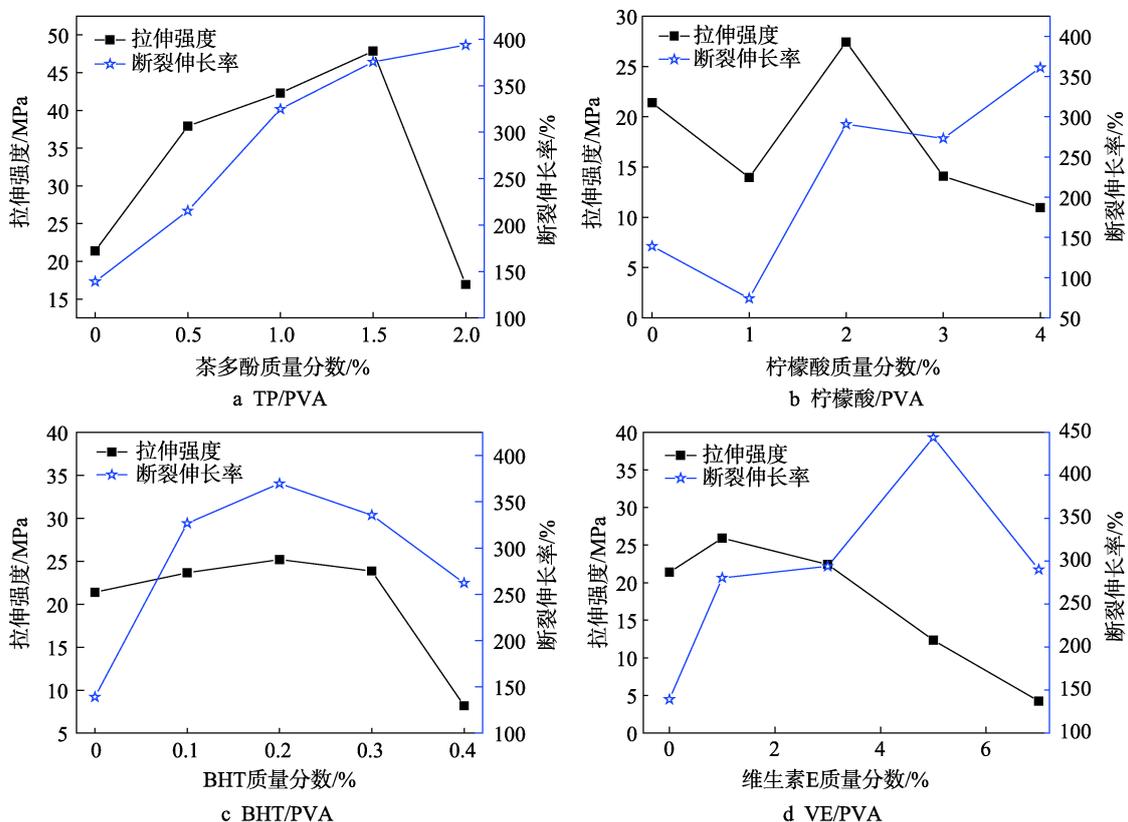


图 4 不同复合膜的拉伸强度和断裂伸长率

Fig.4 Tensile strength and elongation at break of different composite films

用，增强了 PVA 分子链间的流动性，进而提高了复合膜的延展性能，使得断裂伸长率一直增加^[14]。由图 4b 可知，柠檬酸质量分数为 0%~1%时，薄膜的拉伸强度和断裂伸长率处于下降状态；当柠檬酸质量分数为 1%~2%时，拉伸强度和断裂伸长率同时增加；当

柠檬酸质量分数超过 2%后，拉伸强度降低，断裂伸长率增加；质量分数为 2%时，力学性能最好，拉伸强度达到 27.43 MPa，断裂伸长率为 290.65%。这是因为柠檬酸是一种较强的有机酸，少量柠檬酸会破坏 PVA 的支链结构，使复合膜结晶度降低。当柠檬酸质

量分数从 1% 增加至 2% 时, 柠檬酸有一定的增塑作用, 同时会起到交联改性作用。加入更多的柠檬酸后, 会导致聚乙烯醇分子水解, 使柠檬酸/PVA 复合膜的拉伸强度降低^[16]。由图 4c 可知, BHT 质量分数为 0%~0.2% 时, 拉伸强度和断裂伸长率均有一定的升高, 在 0.2% 处达到峰值, 拉伸强度为 25.21 MPa, 断裂伸长率为 369.75%。由于 BHT 可防止由大分子降解造成的链支化, 因而在纯 PVA 膜中加入 BHT 后能增加大分子的链长, 提高复合膜的力学性能; 当质量分数超过 0.2% 时, 此时 BHT 削弱了 PVA 分子间的作用力, 导致复合膜的力学性能下降^[17]。由图 4d 可知, VE 质量分数为 0%~7% 时, 复合膜的拉伸强度有所提高; 当质量分数为 1% 时, 薄膜的拉伸强度最大, 为 25.91 MPa。随着 VE 含量的增加, 薄膜的拉伸强度虽逐渐减小, 但断裂伸长率依然增加, 当质量分数为 5% 时, 达到最高断裂伸长率, 为 443.9%。

2.3 透光率分析

4 种复合膜的透光率见图 6。由图 6a 可知, 加入 TP 后, 在 200~480 nm 范围内, 纯 PVA 膜对紫外线阻隔能力很弱, TP 质量分数为 2% 的复合膜具有优异的阻隔紫外线能力。PVA 膜在 440~800 nm 间的透光率都比较平稳, 透光较好, 大致趋于 75%, 此外不同含量的 TP 复合膜光透过率皆高于 55%。在可见光区, TP (0.5%) /PVA 复合膜的透过率与纯 PVA 膜相近。由图 6b 可知, 加入柠檬酸的 PVA 膜在 240~280 nm 间对短波紫外光有一定的阻隔性, 优于空白对照组。从 280 nm 开始, 透过率逐渐升高并趋于平缓, 达到 80%。柠檬酸上的羧基与 PVA 上的羟基发生反应, 进而与 PVA 很好地融合在一起, 且柠檬酸无水乙醇溶液为无色, 形成的膜液透明无色, 因而透光率整体优于纯 PVA 膜, 当质量分数为 3% 时, 复合膜透光性能最好。由图 6c 可知, 加入 BHT 后, 质量

分数为 0.1% 和 0.4% 的复合膜虽可吸收一定的短波紫外光, 但对中波紫外线 (波长为 280~320 nm) 的阻挡性能比质量分数为 0.2% 和 0.3% 的复合膜差。综上所述, BHT 质量分数为 0.2% 的复合膜抗紫外线能力最好。在 400 nm 后, 膜的透光率趋于平稳, BHT (0.4%) /PVA 复合膜的透光率均低于其他组。由图 6d 可知, 随着维生素 E 的添加, 在 240~340 nm 波段, 复合膜有很好的阻隔性, 具有一定的抗紫外能力。VE (1%) /PVA 复合膜的可见光区透过率与纯 PVA 膜相近, 这是因为 VE 含量较低时复合膜混合均匀、颜色透明; 随着 VE 含量增加, 复合膜透光率有一定下降。这可能是因为市售 VE 胶囊所含其他成分的参与作用, 其中, 植物油和甘油含量增加使得 VE/PVA 复合膜变成了乳白色, 对透光性有一定影响; 在 520~800 nm 波长范围内, 不同含量的复合膜透光率最终趋于平稳, 接近 65%。

2.4 耐水性能分析

不同类型不同含量的抗氧化剂复合膜溶解时间的变化见图 7。PVA 组薄膜的溶解时间为 15.02 min, 水溶性较好。随着 TP 含量不断升高, 复合膜在水中的溶解时间逐渐增加, TP (2%) /PVA 薄膜溶解时间长达 100.05 min。PVA 分子链中含大量亲水性羟基, 对水分子敏感, 随着 TP 的加入, 通过氢键与 PVA 相互作用, 不仅减少了 PVA 中的羟基数量, 也减少了 PVA 中可以与水分子相互作用的作用点, 进而提高了复合膜的耐水性能。柠檬酸复合膜的水解时间呈现出先下降后上升最后又下降的趋势, 柠檬酸 (1%) /PVA 薄膜水解最快, 时间为 6.47 min, 柠檬酸 (2%) /PVA 薄膜的溶解时间最长, 为 16.75 min。BHT 复合膜与柠檬酸大致相同, BHT (0.1%) /PVA 薄膜的水溶解时间最短, 为 7.52 min, BHT (0.3%) /PVA 的水溶解时间最长, 为 16.27 min。VE 复合膜中耐水性最差

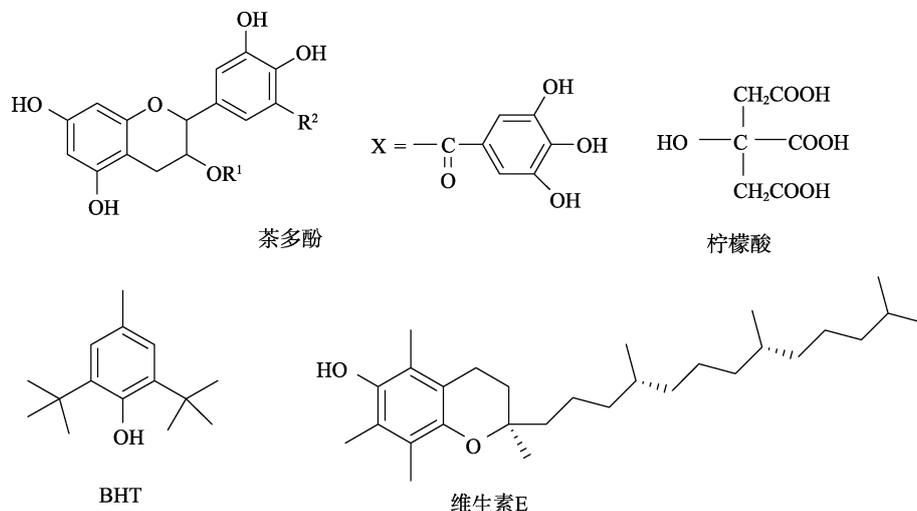


图 5 不同抗氧化剂的分子结构式

Fig.5 Molecular formulas of different antioxidants

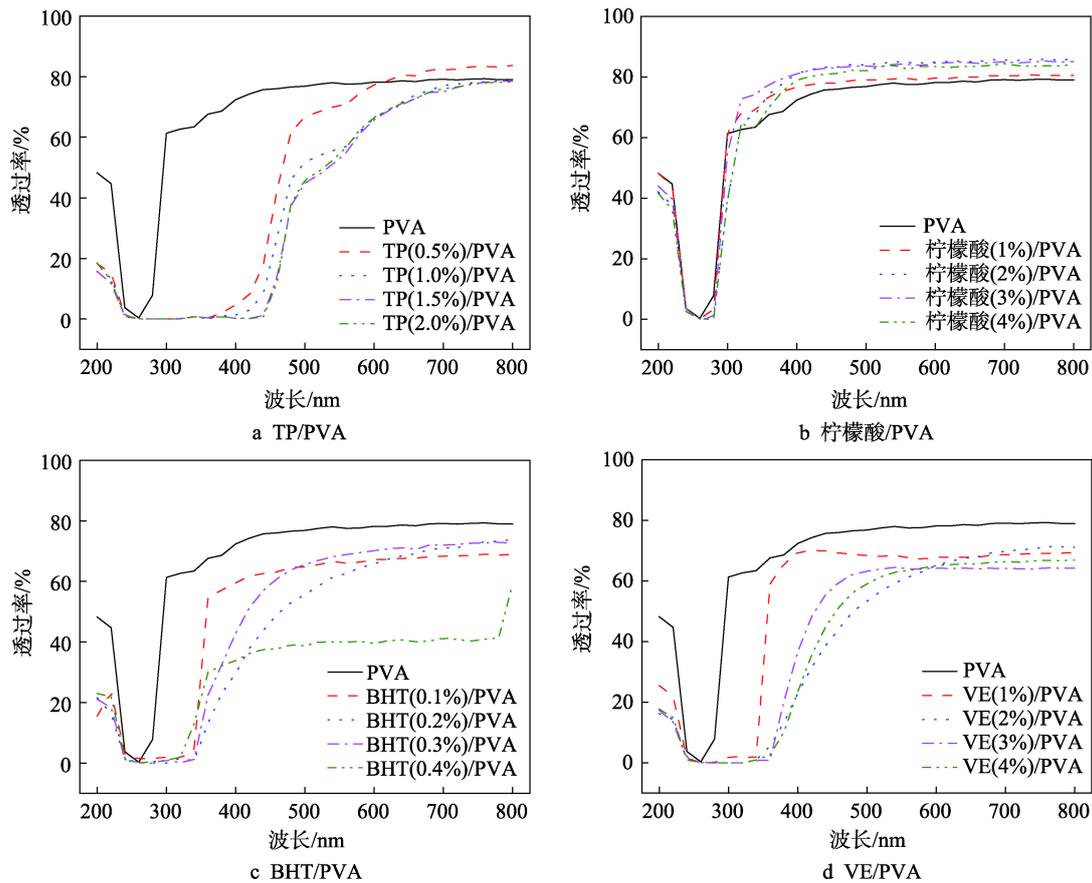


图 6 不同抗氧化剂含量对 PVA 复合膜透光率的影响

Fig.6 Effects of different antioxidants on transmittance of PVA composite films

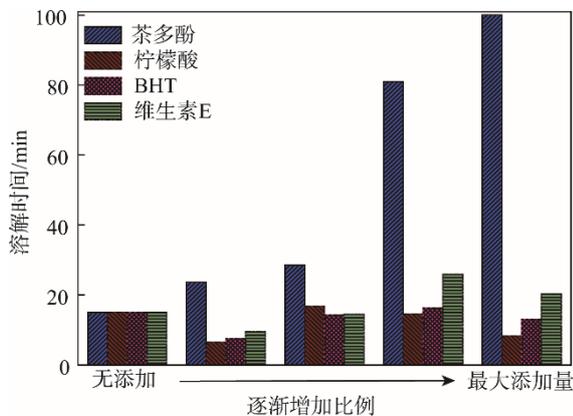


图 7 不同复合膜的水解时间

Fig.7 Hydrolysis time of different composite films

的为 VE (1%) /PVA，时间为 9.47 min；最好的为 VE (5%) /PVA，时间为 25.9 min。

2.5 抗氧化性能分析

不同类型不同含量的抗氧化剂对复合膜抗氧化性能的影响见图 8。不同氧化膜的抗氧化性能大小排序依次为 TP (1.5%) 复合膜>VE (5%) 复合膜>柠檬酸 (2%) 复合膜>BHT (0.2%) 复合膜。由图 8 可知，TP 及柠檬酸的加入皆有助于提高 PVA 膜的抗氧化能力。添加量不同，抗氧化能力也有所差异。添加

不同质量分数 TP 的复合膜，其自由基清除率皆高于纯 PVA 膜，其中 TP (1.5%) /PVA 的自由基清除率为 73.93%，表现出优异的抗氧化能力。随着 TP 质量分数的增加，复合膜抗氧化能力呈现先增长后下降的趋势。由 TP 分子结构式可知（见图 5），TP 酚羟基具有很强的供氢能力，可终止自由基链反应，清除活性氧。随着 TP 质量分数的增加，过量的 TP 堆积在膜表面，不仅使有效酚羟基数量减少，同时易被空气中的氧消耗，故而自由基清除率下降。柠檬酸复合膜的抗氧化能力也皆高于纯 PVA 膜。当柠檬酸质量分数为 1% 时，自由基清除率最低，为 55.97%。当柠檬酸质量分数为 2% 时，可达同类最高的自由基清除率，67.57%。随着柠檬酸质量分数的提高，自由基清除率呈现先增长后下降最后又上升的趋势。笔者认为，柠檬酸中的羟基具有一定还原作用，适量的柠檬酸能增强 PVA 的自由基清除率。随着柠檬酸含量的增加，可能伴随着酯化反应及氢键的形成，降低了自由的羟基含量，进而影响了自由基的清除。随着柠檬酸含量进一步增加，分子间的酯键、氢键达到饱和状态，自由羟基的含量增加，因此自由基的清除率也随之上升。由图 8 可知，BHT (0.2%) /PVA 复合膜的自由基清除率可达 56.48%，处于同类中的波峰位置。VE (5%) /PVA 复合膜的自由基清除率最高，为 69%，

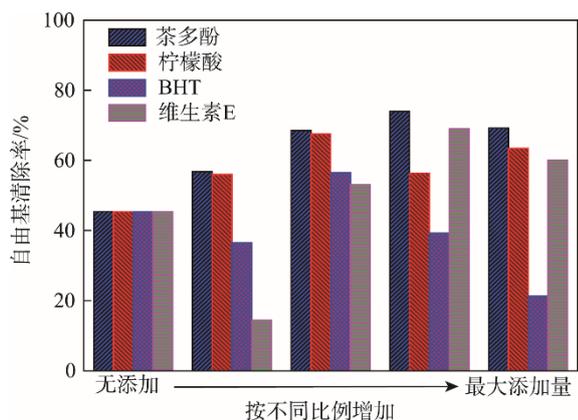


图8 不同复合膜的抗氧化性能

Fig.8 Antioxidant properties of different composite films

随着 VE 质量分数增加至 7% 时, 自由基清除率降低为 60.7%。对比发现, BHT 与 VE 整体的抗氧化能力弱于水溶性的 TP 及柠檬酸。笔者认为 BHT 及 VE 作为脂溶性的抗氧化剂, 其含量影响了 PVA 复合膜的均匀性, 进而也显著影响了自由基清除率。由 BHT 的分子结构式可知, 酚羟基 2, 6 位皆连有位阻较大的叔丁基, VE 中酚羟基的对位也连有大基团, 含量过少会导致其捕捉 PVA 大分子体系中自由基的能力不够, 进而导致抗氧化效果差; 含量过多易发生聚集, 影响有效酚羟基的数量, 进而影响复合膜的抗氧化能力。综上所述, 体系中存在一个最优的有效酚羟基值, 可保证与 PVA 均匀成膜, 同时最大限度降低复合膜中的自由基含量, 进而提高复合膜的抗氧化能力。

3 结语

文中以茶多酚 (TP)、柠檬酸、BHT 和维生素 E (VE) 为变量, 甘油/聚乙烯醇膜液 (PVA) 为基底, 研究了不同水溶性及脂溶性抗氧化剂对薄膜性能的影响。由实验结果可知, 加入合适且适量的抗氧化剂后, 薄膜各项性能均有所增强。TP/PV 复合膜力学性能最好, TP (1.5%) /PV 复合膜的拉伸强度可达 47.85 MPa, 断裂伸长率为 375.69%, 同时可吸收紫外线, 可见光区的透过率、耐水性能较好, 且自由基清除率达到了 73.93%。TP 作为一种水溶性抗氧化剂, 可以与 PVA 均匀混合, 同时分子中存在大量的自由酚羟基, 这是提升复合膜综合性能的关键。柠檬酸也是一种较好的抗氧化剂。脂溶性的 VE 作为抗氧化剂使用时, 复合膜的力学性能虽然不佳, 其表面多孔、凹凸不平、透光能力较差, 但当 VE 含量适当时, 也能表现出优异的抗氧化能力。综合表面形态、力学性能、光学分析、抗氧化能力等各种表现, 添加水溶性茶多酚的 PVA 复合膜, 既改善了薄膜的其他性能, 又大大增强了复合膜的抗氧化能力, 在 PVA 膜体系中是一种性能优异的抗氧化剂。

参考文献:

- [1] TOPUZ F, UYAR T. Antioxidant, Antibacterial and Antifungal Electrospun Nanofibers for Food Packaging Applications[J]. Food Research International, 2020, 130: 108927.
- [2] REJMONTOVA P, KOVALCIK A, HUMPOLICEK P, et al. The Use of Fractionated Kraft Lignin to Improve the Mechanical and Biological Properties of PVA-based Scaffolds[J]. Rsc Advances, 2019, 9(22): 12346—12353.
- [3] OUNKAEW A, KASEMSIRI P, KAMWILAISAK K, et al. Polyvinyl Alcohol (PVA)/Starch Bioactive Packaging Film Enriched with Antioxidants from Spent Coffee Ground and Citric Acid[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2018, 26(9): 3762—3772.
- [4] LIU Y, WANG S, LAN W, et al. Fabrication of Antibacterial Chitosan-PVA Film Using Electrospray Technique for Food Packaging Applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 107: 848—854.
- [5] BREWER M S. Natural Antioxidants: Sources, Compounds, Mechanisms of Action, and Potential Applications[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2011, 10(4): 221—247.
- [6] 钟乐, 曾绮颖, 肖乃玉, 等. 硬脂酸对聚乙烯醇膜水果包装保鲜性能的影响[J]. 包装工程, 2019, 40(15): 67—73.
- [7] ZHONG Le, ZENG Qi-ying, XIAO Nai-yu, et al. Effect of Stearic Acid on the Preservation of Fruit Packaging with Polyvinyl Alcohol Film[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(15): 67—73.
- [8] 郝建文, 戴晨伟, 吴亮. 聚乙烯醇膜的交联改性与应用研究进展[J]. 化工新型材料, 2017, 45(1): 41—43.
- [9] HAO Jian-wen, DAI Chen-wei, WU Liang. Progress in Crosslinking Modification and Application of PVA-based Membrane[J]. New Chemical Materials, 2017, 45(1): 41—43.
- [10] YANG W, OWCZAREK J S, FORTUNATI E, et al. Antioxidant and Antibacterial Lignin Nanoparticles in Polyvinyl Alcohol/Chitosan Films for Packaging[J]. Industrial Crops and Products, 2016, 94: 800—811.
- [11] KASAI D, CHOUGALE R, MASTI S, et al. Influence of Syzygium Cumini Leaves Extract on Morphological, Thermal, Mechanical, and Antimicrobial Properties of PVA and PVA/Chitosan Blend Films[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135(17): 46188.
- [12] 卢芳芳, 王保营, 孙立鹏. 具有抑菌功能的 CTS-PVA-PE 果蔬复合保鲜膜的研究[J]. 现代牧业, 2019, 3(1): 25—28.
- [13] LU Fang-fang, WANG Bao-ying, SUN Li-peng. Development of the Antibacterial CTS-PVA-PE Film for Fruits and Vegetables[J]. Modern Animal Husbandry, 2019, 3(1): 25—28.
- [14] 梁花兰, 章建浩. 聚乙烯醇基涂膜保鲜包装材料制备及对成膜效能特性的影响[J]. 食品科学, 2010,

- 31(8): 73—78.
LIANG Hua-lan, ZHANG Jian-hao. Preparation and Film-forming Properties of a Polyvinyl Alcohol-based Coating Material for Food Fresh-keeping[J]. Food Science, 2010, 31(8): 73—78.
- [12] XING L, ZHANG H, QI R, et al. Recent Advances in the Understanding of the Health Benefits and Molecular Mechanisms Associated with Green Tea Polyphenols[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(4): 1029—1043.
- [13] 朱明秀, 黄崇杏, 蓝鸿雁, 等. 茶多酚对壳聚糖/聚乙烯醇复合膜性能的影响[J]. 包装工程, 2018, 39(5): 110—114.
ZHU Ming-xiu, HUANG Chong-xing, LAN Hong-yan, et al. Effect of Tea Polyphenols on Properties of Chitosan/Polyvinyl Alcohol Composite Films[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(5): 110—114.
- [14] SALEM M Z M, MANSOUR M M A, ELANSARY H O. Evaluation of the Effect of Inner and Outer Bark Extracts of Sugar Maple (*Acer Saccharum* var *Saccharum*) in Combination with Cacid against the Growth of Three Common Molds[J]. Journal of Wood Chemistry and Technology, 2019, 39(2): 136—147.
- [15] YEHYE W A, RAHMAN N A, ARIFFIN A, et al. Understanding the Chemistry behind the Antioxidant Activities of Butylated Hydroxytoluene (BHT): a Review[J]. European Journal of Medicinal Chemistry, 2015, 101: 295—312.
- [16] 刘国安, 李杰林, 李双越, 等. 维生素 C 和维生素 E 的联合抗氧化活性研究[J]. 西北师范大学学报, 2015, 52(2): 66—73.
LIU Guo-an, LI Jie-lin, LI Shuang-yue, et al. Antioxidant Activity Studies of Vitamin C and Vitamin E[J]. Journal of Northwest Normal University, 2015, 52(2): 66—73.
- [17] 李倩文, 杜聪. 纳米二氧化硅改性聚乙烯醇/淀粉复合膜的制备及性能研究[J]. 食品科技, 2018, 48(3): 74—79.
LI Qian-wen, DU Cong. Preparation and Properties of Nano-SiO₂ PVA/Starch Composite Membrane[J]. Food Science and Technology, 2018, 48(3): 74—79.
- [18] 冯涛, 赵宇, 桑敏, 等. 银杏葡萄酒自由基清除能力及其与总酚含量的关系[J]. 食品工业, 2019, 40(5): 180—184.
FENG Tao, ZHAO Yu, SANG Min, et al. The Correlation Study between the Ability of Scavenging Free Radical and the Total Phenolic Content of Ginkgo Wine[J]. Food Industry, 2019, 40(5): 180—184.
- [19] PARK J Y, HWANG K J, YOON S D, et al. Influence of Glyoxal on Preparation of Poly (Vinyl Alcohol)/Poly (Acrylic Acid) Blend Film[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2015, 15(8): 5955—5958.