

农产品贮藏加工

食品保鲜膜的改性及其研究进展

王雅妮^{a,b,c}, 丁洁^{a,b,c}, 徐赵萌^{a,b,c}, 杨华^{a,b,c}, 孙彤^{a,b,c}

(渤海大学 a.食品科学与工程学院 b.辽宁省食品安全重点实验室 c.生鲜农产品贮藏加工
及安全控制技术国家地方联合工程研究中心, 辽宁 锦州 121013)

摘要: **目的** 讨论改善可食性保鲜膜、人工合成高分子聚合物薄膜以及可降解保鲜膜的理化性能和提高抗菌性能的改性方法, 旨在为食品保鲜膜的改性提供方法指导。**方法** 采用添加无机微纳米材料、天然抗菌剂或将多种抗菌物质聚合等方法研究食品保鲜膜的理化性能及其抗菌性能。**结果** 添加无机微纳米材料改善食品保鲜膜的理化性能, 提高其抗菌性能的研究思路和方法已较为成熟, 其中采用原位合成纳米材料技术改性食品保鲜膜的效果较好, 但食品保鲜膜的抗菌机理研究有待进一步深入。**结论** 微纳米及生物抗菌剂复合技术在食品保鲜膜改性中的应用具有良好的发展前景, 可为安全长效的新型食品保鲜材料的开发提供理论支持。

关键词: 保鲜膜; 改性; 抗菌性能

中图分类号: TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)01-0001-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.01.001

Modification and Research Progress of Food Preservation Films

WANG Ya-ni^{a,b,c}, DING Jie^{a,b,c}, XU Zhao-meng^{a,b,c}, YANG Hua^{a,b,c}, SUN Tong^{a,b,c}

(a.School of Food Science and Engineering b.Key Food Safety Laboratory of Liaoning Province c.National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, Bohai University, Jinzhou 121013, China)

ABSTRACT: The work aims to discuss the modification methods of improving physical and chemical properties and antibacterial properties of edible preservation film, synthetic polymer film and degradable preservation film, in order to provide guidance for the modification of food preservation film. The physical and chemical properties and antibacterial properties of food preservation film were studied by adding inorganic micro and nano materials, natural antibacterial agents or by polymerizing various antibacterial substances. The research ideas and methods of adding inorganic micro and nano materials to improve the physical and chemical properties and the antibacterial properties of food preservation film became relatively mature. The modification of food preservation film by in-situ synthesis of nanomaterials had a better effect, but the antibacterial mechanism of food preservation remained to be further studied. The application of the composite technology of micro, nano and biological antibacterial agent in the modification of food preservation film has a good prospect and can provide theoretical support for the development of new safe and long-term food preservation materials.

KEY WORDS: preservation film; modification; antibacterial properties

收稿日期: 2020-07-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0400805)

作者简介: 王雅妮 (1996—), 女, 渤海大学硕士生, 主攻水产品贮藏加工及质量安全控制。

通信作者: 孙彤 (1966—), 女, 博士, 渤海大学教授、博导, 主要研究方向为水产品贮藏加工及质量安全控制。

随着社会经济的发展,人们对食品安全问题越来越重视,而食品在贮运和销售过程中极易腐败变质,从而造成经济损失。食品包装可以保护食品免受微生物等污染,是食品加工、储运过程中必不可少的一部分。包装材料的性质因材而异,故材料的选取尤为重要。目前,常用的包装膜主材有聚乙烯(PE)、聚酰胺(PA)、聚乙烯醇(PVA)等。除此之外,微孔保鲜膜、抗菌保鲜膜、硅窗调剂薄膜、防雾保鲜膜、纳米复合型保鲜膜等也是常见的包装材料。文中主要对可食性包装膜、人工高分子聚合物、可降解包装膜的改性及其抑菌性能研究进行概述。

1 食品包装膜的分类及应用

1.1 可食性薄膜

随着人们食品安全意识的提高,安全、环保的可食性保鲜膜逐渐成为研究热点。可食性保鲜膜是人们将天然可食性成膜材料应用于食品保鲜的产物,既是食品包装,又是食品的一部分,且对环境无污染^[1]。按照成膜材料的种类,可食性保鲜膜分为蛋白类、脂质类、多糖类和复合膜类。壳聚糖作为可食性薄膜材料之一,是一种常见的活性包装材料^[2]。可食性保鲜膜的保鲜效果较好且安全环保,是果蔬、肉类和水产品保鲜领域的研究热点^[3]。因成本限制,目前还没有实现大规模的商业化^[4]。

1.2 人工合成高分子聚合物薄膜

人工合成高分子聚合物是由可聚合的小分子化合物经聚合反应形成的高分子化合物。美国科学家卡罗瑟斯自1929年研究出了尼龙-66后,聚苯乙烯、氯丁橡胶、聚氯乙烯、聚酰胺、聚乙烯等高分子材料相继问世。近年来,合成高分子材料的结构性能更加优化,针对不同的物理性能制备的薄膜已应用于各个领域。在食品包装领域,聚酰胺、聚乙烯和聚乙烯醇等高分子材料倍受关注。

1.2.1 聚酰胺薄膜

近年来,表面活化技术已被用于开发和制造具有抗菌活性的聚酰胺(Polymides, PA)基包装材料,包括抗菌软包装等^[5]。由于聚酰胺薄膜具有较高的耐热性和耐有机溶剂性能,也具有优异的电绝缘性、力学性能和气体阻隔性能,故其使用温度范围广,抗冲击性好,已被广泛应用于日用品包装、电子产品包装、药品包装、食品包装等领域^[6-8]。由于聚酰胺的熔融温度高,溶解性较差,加工比较困难,限制了其进一步推广^[9-10]。

1.2.2 聚乙烯薄膜

聚乙烯(Polyethylene, PE)具有无毒、无臭、安全性高、阻湿性强、热封性良好等特点,以其为基

材制备的抑菌薄膜已普遍应用于食品包装、农业、医学等领域^[11-13]。由于低密度聚乙烯(Low Density Polyethylene, LDPE)的成本较低,且LDPE膜具有较好的弹性、韧性、抗低温性、透光性以及热抗性^[14],是PE膜中应用最广泛的品种之一,但LDPE薄膜的化学结构易受环境因素的影响,如光照、温度和湿度等^[15-16]。此外,由于PE薄膜的水分子透过率较低,在使用过程中易在其表面形成薄雾,降低其透明度,影响产品的外观^[17],影响了PE薄膜的广泛应用。

1.2.3 聚乙烯醇薄膜

聚乙烯醇具有较强的极性,并具有抗静电性,广泛应用于光电阻燃、医药和食品保鲜等领域^[18-20]。聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, PVA)材料的生物降解性较好、机械强度较高^[21-22]。2003年,粮农组织/世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会(JECFA)第61次会议对PVA进行了安全性评估^[23]。PVA还被美国农业部批准用于肉类和家禽产品的包装^[24-25],然而其耐久性和热塑加工性较差,使其在各个领域的应用受到了限制^[26]。

1.3 可降解薄膜

可降解薄膜是采用可生物降解材料制备的,其降解速率会受到温度、相对分子质量、材料结构等因素的影响^[27]。可降解保鲜膜对保护环境有着重要意义,也具有极大的发展潜力^[28]。聚乳酸(Polylactic acid, PLA)是一种可降解的半结晶聚酯,将糖、玉米等物质发酵成乳酸,再通过聚合可制成聚乳酸。聚乳酸的结晶程度存在差异,且抗冲击韧性较低,限制了其在包装领域的应用^[29]。

2 食品保鲜膜的改性研究

2.1 食品保鲜膜的理化性能改善

传统薄膜虽具有一定的保鲜性能,但已经不能满足现代市场的需求。目前,食品包装对阻湿、防水、耐油、耐酸等功能的要求更高。为解决这些问题,改性包装材料,以改善其拉伸强度及亲水亲油等理化性能,可实现延长食品保质期的目的。

微纳米材料可在一定程度上改善高分子聚合物的理化性能。有研究表明,将有机改性蒙脱土和苯乙烯-马来酸酐共聚物共同添加至尼龙6/聚苯醚共混物中,苯乙烯-马来酸酐共聚物有助于尼龙6/聚苯醚/有机改性蒙脱土共混物中有机改性蒙脱土团聚体的均匀分散,且有机改性蒙脱土可大幅度降低尼龙6/聚苯醚/苯乙烯-马来酸酐共混物的粘度^[30]。郝文婷等^[31-32]采用原位合成纳米SiO_x改性壳聚糖涂膜后,提高了其力学强度,降低了水蒸气、O₂透过率,增加了CO₂透过率,提高了透光性,提高了涂膜对美国红鱼的保

鲜性能。

多种物质聚合和共混也有助于改善高分子膜的理化性能。己内酰胺与间对苯二甲酸己二胺盐（6I 盐）聚合可制备系列共聚尼龙 6/6I。共聚组分 6I 的引入会导致体系结晶温度与熔点的降低，同时，提高共聚体系的拉伸和弯曲强度^[33]。为改善 LDPE 薄膜的性能，Ashram 等^[34]采用共混法获得了低密度聚乙烯/天然橡胶/聚乙烯醇/淀粉/甘油共混膜，在 15 kGy 辐照下，膜的热稳定性得到改善，拉伸强度和断裂伸长率等力学性能得到提高。PVA 和甘油使共混膜内低密度聚乙烯、天然橡胶和淀粉之间的界面粘附性能增强。

辐照干扰也可促进聚物理化性能的提高。有研究表明，红外激光辐照使聚乙烯醇/聚乙二醇（PVA/PEG）共聚物的结晶度降低，回弹性增大^[35]。以聚酰胺薄膜为基材，制备复合纳米滤膜时，为增强膜表面的亲水性能，Thu 等^[36]使用 15 mg/L 的钛涂层溶液将钛涂层膜成功涂覆于 PA 薄膜表面，并采用紫外线照射增加了膜表面的亲水性，使薄膜获得了高水平的润湿性能。

2.2 食品保鲜膜抗菌性能的增强

微生物的生长繁殖是引起食品腐败变质的主要因素之一，故要求食品包装膜具有一定的抗菌性能。将抗菌剂等具有抗菌性能的物质添加至食品包装膜材料中，可赋予包装膜一定的抗菌性能。包装材料中的活性物质缓释于被包装食品表面，可抑制食品中微生物的生长繁殖，进而抑制食品腐败变质，延长其货架期。如将纳他霉素（Natamycin, Nat）直接喷涂在热软化的聚乙烯薄膜表面，可获得抗真菌薄膜，该膜已应用于奶酪包装，其抗真菌效果显著^[37]。刘冰等^[38]将植酸钠与壳聚糖联合应用于南极磷虾的冷冻保鲜，结果显示，植酸钠提高了壳聚糖涂膜的抗菌性能，显著抑制了冷藏过程中南极磷虾微生物的生长、pH 值的升高、总挥发性碱性氮的增加和感官指标的退化。为获得具有长效抗菌性能的抗菌保鲜膜，张家涛等^[39-40]制备了能够竞争缓释和逐级缓释保鲜剂的高分子膜，将茶多酚（Tea Polyphenol, TP）微胶囊与溶菌酶（Lysozyme, LZM）共同加入至聚乙烯醇（Polyvinyl Acetate, PVA）涂层中，涂膜的理化性能得到显著改善，同时其抗菌性能增强，并使其抗菌作用时限延长，涂膜对海鲈鱼鱼片的保鲜性能得到有效改善，鱼片的货架期延长。

2.3 食品保鲜膜综合性能的改进

食品保鲜膜可隔绝氧气防止氧化，同时也可预防外界细菌对食品的污染，进而达到延长货架期的目的。普通保鲜膜存在透气性差、抗菌性能低等缺点，其应用范围有限。改善食品保鲜膜的综合性能有助于提高其保鲜性能，从而满足各类食品的需求。

在高分子材料中加入纳米材料、抗菌物质等可改变其综合性能。以 LDPE 为基材，将改性 T 树脂和改性纳米 ZnO 加入其中，可制得改性 PE 薄膜。当改性纳米 ZnO 的质量分数为 1.5%，改性 T 树脂的质量分数为 1% 时，改性薄膜的水蒸气透过量 and 氧气透过量最小，抗拉强度和断裂伸长率最大，薄膜的阻隔效果和抑菌性能较好^[12]。杨福馨等^[41]以聚乙烯醇(PVA)为成膜基材，在香蕉皮浆中加入纯 PVA 制成改性薄膜。当香蕉皮浆质量分数为 2% 时，改性 PVA 薄膜的拉伸强度最大；当香蕉皮浆质量分数为 3% 时，改性 PVA 薄膜的吸水性降低，热封强度最大，对蛋糕的抗菌保鲜效果最优，且双层薄膜的保鲜效果优于单层薄膜。

多种材料的复合和共混也可改善食品保鲜膜的综合性能。梁孝林等^[42]研制了一种基于马来酸酐改性木质素(LM)、环氧大豆油(ESO)与聚乳酸(PLA)的全生物基复合材料(PLA/ESO/LM)。结果表明，ESO 能提升 PLA 的韧性，LM 能促进 PLA 的结晶能力，降低材料结晶温度，提高材料的热稳定性。在优化配方下，PLA/20ESO/0.5LM 复合材料具有最优的综合性能，拉伸强度为 55 MPa，断裂伸长率为 198%，约为 PLA 膜的 20 倍，在提高 PLA 材料韧性的前提下，保证了 PLA 材料优良的拉伸性能，极大程度地改善了 PLA 材料的综合性能。

3 食品保鲜膜的抑菌性能及抑菌机理研究

3.1 纳米材料对食品保鲜膜抑菌性能的影响及其抑菌机理研究

纳米粒子改性不仅可以促进保鲜膜力学性能和阻隔性的提高，还有助于保鲜膜抑菌性能的提高。

银纳米粒子（AgNPs）对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等微生物有强烈的抑制和杀灭作用。在聚酰胺薄膜复合膜上强而有效地固定 AgNPs，能够赋予其优良的抗菌活性。AgNP@SiO₂-固定化膜的颗粒覆盖率相对较低，但其对大肠杆菌、铜绿假单胞菌和金黄色葡萄球菌的抑菌效果较好^[43]。Liu 等^[44]采用逐层界面聚合（LBL-IP）方法将 AgNPs 以共价方式固定在聚酰胺复合薄膜表面，AgNPs 的掺入对聚酰胺层表面粗糙度和电荷的影响很小，不影响膜的通透性。大肠杆菌附着在 AgNPs 修饰的聚酰胺薄复合膜上后被大量杀灭。这是由于复合膜内 AgNPs 释放出的 Ag⁺促进活性氧（ROS）的产生，并诱导细胞膜损伤。Yumi 等^[45]利用含 AgNPs 的 LDPE 和聚丙烯（PP）2 种聚合物的母粒制备了纳米 LDPE-PP 复合膜。当复合膜中 AgNPs 含量为 3 mg/kg 时，24 h 后，对大肠杆菌的抑制率为 88.8%，对金黄色葡萄球菌的抑制率为 95.2%，Ag/LDPE 纳米复合膜对金黄色葡萄球菌更有效。这

可能是由于革兰氏阳性细菌中存在较厚的肽聚糖层,吸引 Ag^+ ,而复合膜中的 AgNPs 释放 Ag^+ ,与细菌细胞壁的成分相互作用,破坏菌体内的酶和 DNA,导致细菌死亡。此外,纳米颗粒表面产生的活性自由基也可能是其抗菌活性增强的原因之一。Wei 等^[46]以 ZnO 微球和 Ag/ZnO 微球为改性剂,采用流延法制备了壳聚糖(CS)涂膜。 Ag/ZnO 微球的改性效果优于 ZnO 微球,当 Ag/ZnO-CS 质量分数为 0.5%时,复合涂膜的改性效果最佳。与 CS 涂膜相比, Ag/ZnO-CS 复合涂膜的抗菌活性也进一步增强,这是由于 CS, ZnO 和 Ag/ZnO 微球可破坏细菌的细胞膜和细胞壁,离子相互作用导致细菌细胞膜严重受损,细胞内容物完全泄漏,干扰了高分子量总蛋白和低分子量膜蛋白的合成。

纳米氧化锌(ZnO)同样具有优良的抗菌性能。张麟等^[47]在不使用任何表面活性剂或模板的情况下,通过控制工艺条件,采用沉淀法在水介质中成功地合成了具有均匀形态特征的分层的花状和棒状 ZnO 纳米颗粒。结果表明,棒状 ZnO 纳米颗粒对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌等菌株的抗菌活性均优于花状 ZnO 纳米颗粒。这可能是由于 ZnO 颗粒与细菌表面接触产生活性氧,或 Zn^{2+} 溶出,与菌体细胞膜蛋白发生作用,导致细菌细胞死亡。Wei 等^[48-49]采用 ZnO/TiO_2 纳米粒子与原位合成纳米 SiO_x 共改性的方法,改善了复合壳聚糖涂膜的微观结构和理化性能。与未采用 ZnO/TiO_2 纳米粒子改性的壳聚糖涂膜相比,采用 ZnO/TiO_2 纳米粒子的理化性能得到显著提高,提高了银鱼鱼丸的保鲜性能,增强了水产品腐败希瓦氏菌的杀菌能力。

Seyedpour 等^[50]在聚酰胺复合膜(TFC)中加入石墨烯量子点(GQDs),改善了薄膜表面的亲水性和抗菌活性。结果表明,与原始 TFC 膜相比,加入 GQDs 质量分数为 0.5%的复合纳米薄膜分别使大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的失活率达到 90%和 95%以上。这可以归因于 GQDs 的低聚集和均匀分散,增强了其与细菌细胞的接触,导致细菌失活。Li 等^[51]采用简捷的静电驱动方法合成了磷酸银(AP)负载氧化石墨烯量子点(GOQD)的多功能纳米复合材料,随后,通过界面聚合反应将 GOQD/AP 嵌入致密的聚酰胺层中,制备了抗菌纳米复合反渗透膜。由于 GOQD 和 AP 具有协同杀菌作用,纳米复合薄膜表现出对大肠杆菌较强的杀菌能力。一方面,GOQD 中带负电荷的羧基有利于膜与带负电荷的细菌之间的静电排斥;另一方面, Ag^+ 可以激活空气或水中的氧分子,产生羟基自由基和超氧自由基,在无光照的情况下进一步氧化杀菌。

3.2 生物保鲜剂对食品保鲜膜抑菌性能的影响及其抑菌机理研究

食品在贮藏过程中极易受到微生物的污染,发生

腐败变质,造成经济损失。生物保鲜剂是指从动物、植物和微生物中提取的,天然的或利用生物工程技术获得的,对人体无危害的保鲜剂。食品包装膜中添加生物保鲜剂可以降低食品腐败变质的风险,并达到抑菌的目的。

抗菌剂能够在一定时间内延缓某些微生物的生长或繁殖。Li 等^[52]采用静电纺丝法制备了以石榴皮提取物(PPE)和去氢乙酸钠(SD)为主要成分的活性聚乙烯醇(PVA)复合膜。结果表明,在 PVA 薄膜中加入 PPE 和 SD 可以提高其断裂伸长率,改善其力学性能,但对膜的透光率和透气性没有显著影响。随着 PPE 和 SD 的增加,复合薄膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌能力增强。这是因为 PPE 富含多酚类物质,其中的单宁通过沉淀蛋白质改变微生物的形态,导致细胞膜渗漏,细胞裂解。除此之外,Mojtaba 等^[53]制备了含黑胡萝卜素和膨润土纳米粘土的壳聚糖/PVA 智能包装膜。研究结果表明,由于革兰氏阴性菌的外膜脂多糖与膨润土的铝硅酸盐表面之间的疏水相互作用,粘土类化合物仅对革兰氏阴性菌有抑菌活性。由于花青素中存在各种化合物,包括酚酸等不同化学形式的混合物,其抗菌活性中可能存在多种作用机制及其协同增效作用,导致对革兰氏阴性菌和革兰氏阳性菌均有抑制作用。Maryam 等^[54]将壳聚糖纳米纤维 CSNF 和肉桂精油(CiEO)加入纳米脂质载体(NLCs)中,开发了一种生物可降解的乳清蛋白分离物(WPI)为基础的薄膜。结果表明,添加精油的薄膜的最低抑菌浓度显著降低,大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的质量浓度分别从 2200 $\mu\text{g/mL}$ 和 4400 $\mu\text{g/mL}$ 都降至 1100 $\mu\text{g/mL}$ 。

4 结语

提高食品保鲜膜的理化性能和抗菌性能可更好地抑制贮藏过程中的食品腐败变质。研究表明,微纳米材料可在一定程度上改善高分子聚合物的理化性能,多种物质聚合共混和辐照干扰也有助于改善高分子膜的理化性能。 Ag 、 ZnO 、氧化石墨烯量子点等无机微纳米材料有助于高分子膜抗菌性能的提高,原位合成和原位改性纳米技术对食品保鲜膜的改性效果更好。具有抑菌性能的生物抗菌剂在食品保鲜膜中的复合赋予了食品保鲜膜更优的理化性能和抗菌性能,逐级缓释和竞争缓释技术有利于食品保鲜膜长效作用的发挥。在未来的食品保鲜膜改性研究中,纳米材料与生物保鲜剂的联合应用将更有效地促进其各项性能的提高,并将成为研究重点之一。

参考文献:

- [1] FALGUERA V, QUINTERO J P, JIMENEZ A, et al.

- Edible Films and Coatings: Structures, Active Functions and Trends in Their Use[J]. Trends in Food Science & Technology, 2011, 22(6): 292—303.
- [2] GOMES L P, SOUZA H K S, CAMPIFIA J M, et al. Edible Chitosan Films and Their Nanosized Counterparts Exhibit Antimicrobial Activity and Enhanced Mechanical and Barrier Properties[J]. Molecules, 2019, 24(1): 127: 1—14.
- [3] 肖蕾, 蓝蔚青, 孙晓红, 等. 金枪鱼常用保鲜方式及品质检测技术研究进展[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 115—120.
- XIAO Lei, LAN Wei-qing, SUN Xiao-hong, et al. Research Progress in Commonly Used Preservation Methods and Quality Detection Techniques of Tuna[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(5): 115—120.
- [4] 王君, 咎艳君. 可食性大豆分离蛋白保鲜膜的研制[J]. 包装与食品机械, 2017, 35(3): 11—16.
- WANG Jun, ZAN Yan-jun. Preparation of Edible Soy Protein Isolated Film[J]. Packaging and Food Machinery, 2017, 35(3): 11—16.
- [5] ANDREY A T, JOE P K. Review of Surface Treatment Methods for Polyamide Films for Potential Application as Smart Packaging Materials: Surface Structure, Antimicrobial and Spectral Properties[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 24: 2214—2894.
- [6] IGNACIO A J, ALAIN T C, CLAUDIO A T, et al. Synthesis and Thermal, Optical and Morphological Characterization of Oligomeric Polyamides Based on Thiophene and Alkyl/Phenyl-silane Moieties. Study of the Electrospun Deposition Process[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133(29): 1—9.
- [7] 朱炳发, 温变英, 张扬. PA6 基绝缘导热工程塑料老化性能研究[J]. 绝缘材料, 2018, 51(5): 22—28.
- ZHU Bing-fa, WEN Bian-ying, ZHANG Yang. Study on Ageing Properties of PA6 Based Insulating and Thermal Conductive Engineering Plastic[J]. Insulation Materials, 2018, 51(5): 22—28.
- [8] TERRAZA C A, TAGLE L H, MEJIAS D, et al. Synthesis and Characterization of New Poly(amide)s Derived from Bis(4-(4-aminophenoxy)-phenyl)-Methylphenylsilane and Bis(4-carboxyphenyl) R1R2 Silane Acids[J]. Polymer Bulletin, 2013, 70(3): 773—788.
- [9] 石粟军, 何比祖, 陈培才, 等. 含叔丁基和萘结构可溶性聚酰胺的合成及表征[J]. 绝缘材料, 2017, 50(5): 12—15.
- SHI Su-jun, HE Bi-zu, CHEN Pei-cai, et al. Synthesis and Characterization of Soluble Polyamides Containing Tert-butyl and Naphthalene[J]. Insulation Materials, 2017, 50(5): 12—15.
- [10] 覃伟康, 李华, 罗松贵, 等. 含吗啉基苯基可溶性聚酰胺的制备及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(8): 15—19.
- QIN Wei-kang, LI Hua, LUO Song-gui, et al. Synthesis and Properties of Soluble Polyamides Containing Morpholinylphenyl[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2018, 34(8): 15—19.
- [11] 陈明. LDPE 薄膜料的结构与性能研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2015: 1—60.
- CHEN Ming. Studies on the Structure and Properties of LDPE Film Resin[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2015: 1—60.
- [12] 程龙, 杨福馨, 姜悦, 等. 纳米 ZnO-T 树脂改性聚乙烯薄膜的制备和性能[J]. 功能材料, 2019, 50(10): 10163—10167.
- CHENG Long, YANG Fu-xin, JIANG Yue, et al. Preparation and Properties of Nano-ZnO-T Resin Modified Polyethylene Film[J]. Functional Materials, 2019, 50(10): 10163—10167.
- [13] 郝冬冬, 丁永红, 闫秋羽. 偶联剂处理滑石粉填充聚乙烯薄膜的研究[J]. 包装工程, 2020, 41(3): 145—149.
- HAO Dong-dong, DING Yong-hong, YAN Qiu-yu. Polyethylene Film Filled with Talc Modified by Coupling Agent[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(3): 145—149.
- [14] BRIASSOULIS D, WAAYENBERG D, GRATRAUD J, et al. Mechanical Properties of Covering Materials for Green Houses, part I: a General Overview, part II: Quality Assessment[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 67: 1—81.
- [15] 宋美丽, 谷宇, 田广华, 等. 聚乙烯薄膜的性能及应用综述[J]. 合成材料老化与应用, 2018, 47(3): 115—118.
- SONG Mei-li, GU Yu, TIAN Guang-hua, et al. Brief Introduction of Properties and Applications of Polyethylene Film[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2018, 47(3): 115—118.
- [16] 邹平, 肖林刚, 王瑞, 等. 农用低密度聚乙烯薄膜的降解特性研究[J]. 新疆农机化, 2019(5): 40—43.
- ZOU Ping, XIAO Lin-gang, WANG Rui, et al. Study on Degradation Characteristics of Agricultural Low Density Polyethylene Films[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2019(5): 40—43.
- [17] 许兵. 高透湿性聚乙烯薄膜的制备及其对小黄瓜保鲜效果的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018: 1—42.
- XU Bing. Study on the Preparation of High Permeability Polyethylene Film and the Effect of Minicucumber Preservation[D]. Hohhot: Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2018: 1—42.
- [18] 翟纬坤, 王源升, 王轩, 等. 聚乙烯醇发泡成型技术及其吸水性能研究进展[J]. 包装工程, 2019, 40(7): 96—102.
- ZHAI Wei-kun, WANG Yuan-sheng, WANG Xuan, et al. Research Progress of PVA Foaming and Molding Technology and Its Water Absorption Properties[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(7): 96—102.
- [19] 周敏, 曾尚恒, 李鑫, 等. 高透明柔性含磷聚乙烯醇

- 阻燃薄膜[J]. 化学与生物工程, 2019, 36(3): 7—12.
- ZHOU Min, ZENG Shang-heng, LI Xin, et al. Flame-Retardant Phosphorus-containing Polyvinyl Alcohol Film with High Transparency and Flexibility[J]. Chemical Bioengineering, 2019, 36(3): 7—12.
- [20] 翟伟坤, 王源升, 王轩. 聚乙烯醇/壳聚糖季铵盐薄膜的制备及其对黄骨鱼保鲜效果研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 239—243.
- ZHAI Wei-kun, WANG Yuan-sheng, WANG Xuan. Preparation of Polyvinyl Alcohol/Chitosan Quaternary Ammonium Salt Film and Its Preservation Effect of Yellow Bone Fish[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(6): 239—243.
- [21] WU M L, CHEN Y, ZHANG L, et al. High-performance Carbon Nanotube/polymer Composite Fiber from Layer-by-layer Deposition[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2016, 8(12): 1457—1465.
- [22] 葛亚丽, 上媛媛. 不同浓度碳纳米管/聚乙烯醇薄膜的机械性能的研究[J]. 人工晶体学报, 2019, 48(6): 1139—1143.
- GE Ya-li, SHANG Yuan-yuan. Study on Mechanical Properties of Carbon Nanotube/PolyVinyl Alcohol Composite Film with Different Concentration[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2019, 48(6): 1139—1143.
- [23] MASSIMO B, FABIO L, ANDREA P, et al. Properties of Poly(Vinyl Alcohol) Films as Determined by Thermal Curing and Addition of Polyfunctional Organic Acids[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2018, 18: 95—100.
- [24] SWEETIE R K, RAO M S, CHAWLA S P, et al. Active Chitosan-Polyvinyl Alcohol Films with Natural Extracts[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 29(2): 290—297.
- [25] HOSSEIN H, SERGE K L, FRANK P, et al. Development of Antimicrobial Films Based on Chitosan-polyvinyl Alcohol Blend Enriched with Ethyl Lauroyl Larginate (LAE) for Food Packaging Applications[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105419—105429.
- [26] 黄飞扬, 梁峻铖, 蒋欢, 等. 酯化聚乙烯醇薄膜的制备[J]. 山东化工, 2019, 48(11): 14—15.
- HUANG Fei-yang, LIANG Jun-cheng, JIANG Huan, et al. Polyvinyl Alcohol Film Preparation[J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(11): 14—15.
- [27] 李月明, 张泓, 周三九, 等. 可降解壳聚糖淀粉抗菌复合膜对红提葡萄保鲜效果的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2017(5): 67—72.
- LI Yue-ming, ZHANG Hong, ZHOU San-jiu, et al. Preservation Effect of Degradable Chitosan Starch Antibacterial Composite Membrane on Red Grape[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2017(5): 67—72.
- [28] 于艳梅. 载那他霉素壳聚糖淀粉复合抗菌薄膜对巨峰葡萄保鲜效果评价[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2013: 1—5.
- YU Yan-mei. Evaluation of the Preservation Performance of Chitosan-starch Composite Antibacterial Films Loading Natamycin on Kyoho Grape[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2013: 1—5.
- [29] LIZUNDIA E, FORTUNATI E, DOMINICI F, et al. PLLA Grafted Cellulose Nanocrystals: Role of the CNC Content and Grafting on the PLA Bionanocomposite Film Properties[J]. CarbohydrPolym, 2016, 5(142): 105—113.
- [30] 吴亦建. 高强高韧尼龙 6 复合材料的制备与性能[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 1—120.
- WU Yi-jian. Preparation and Properties of Polyamide-6 Composites with Hiizh Tensile Strength and Good Toughness[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 1—120.
- [31] 郝文婷, 郝晗, 孙彤, 等. 纳米 CaCO_3 原位改性对壳聚糖复合涂膜性能的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(1): 71—76.
- HAO Wen-ting, HAO Han, SUN Tong, et al. Influence of the in-situ Modification of Nano- CaCO_3 on the Properties of Composite Chitosan Coatings[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(1): 71—76.
- [32] SUN T, HAO W T, LI J R, et al. Preservation Properties of in Situ Modified CaCO_3 -Chitosan Composite Coatings[J]. Food Chemistry, 2015, 183(15): 217—226.
- [33] 曹凯凯, 甘顺昌, 陈林飞, 等. 共聚尼龙 6/6I 的制备与性能研究[J]. 塑料工业, 2017, 45(11): 19—23.
- CAO Kai-kai, GAN Shun-chang, CHEN Lin-fei, et al. Preparation and Performance Study of Copolyamide PA6/6I[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(11): 19—23.
- [34] ASHRAM M A G, HUSSEIN E A, NABILA A. Maziad. Modification of Low Density Polyethylene Films by Blending with Natural Polymers and Curing by Gamma Radiation[J]. Polymer Science, Series B, 2019, 61(6): 776—784.
- [35] NOUH A, BENTHAM K, ABUTALIB M M. Modification of Structural and Optical Properties of Polyvinyl Alcohol/Polyethylene Glycol Thin Film by Laser Irradiation[J]. Radiation Effects and Defects in Solids, 2016, 171(1/2): 87—95.
- [36] THU H A N, DUNG T N, KHAI D D, et al. Surface Modification of Polyamide Thin Film Composite Membrane by Coating of Titanium Dioxide Nanoparticles[J]. Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 2016, 1(4): 1—8.
- [37] ANA L G, VÁZQUEZ B M, BIANCHINOTTI M V, et al. Development of an Antifungal Film by Polyethylene Surface Modification with Natamycin[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2018, 18: 191—200.
- [38] LIU B, PAN S K. Effect of Chitosan Coatings Incorporated Sodium Phytate on the Shelf-life of Antarctic

- Kkrill (*Euphausiasuperba*)[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 151: 14765—14772.
- [39] ZHANG J T, LI Y C, ZHANG X, et al. Physicochemical Properties and Antibacterial Mechanism of TP Microcapsules/LZM-PVA Gradual Sustained-release Composite Coatings[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 146: 1—9.
- [40] 张家涛, 张璇, 魏旭青, 等. 茶多酚微胶囊/溶菌酶-聚乙烯醇复合涂膜对美国红鱼鱼片的保鲜性能[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(8): 273—278.
- ZHANG Jia-tao, ZHANG Xuan, WEI Xu-qing, et al. Preservative Properties of TP Microcapsules/LZM-PVA Composite Coatings on *Sciaenops Ocellatus* Fillets[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(8): 273—278.
- [41] 杨福馨, 范飞, 洗厉君, 等. 香蕉皮浆改性聚乙烯醇薄膜制备及对蛋糕包装保鲜的研究[J]. *上海塑料*, 2017(3): 47—52.
- YANG Fu-xin, FAN Fei, XI Li-jun, et al. Study on Preparation of Banana Peel Modified Polyvinyl Alcohol Film and Preservation of Cake Packaging[J]. *Shanghai Plastics*, 2017(3): 47—52.
- [42] 梁孝林, 刘文毅, 章丰凯, 等. 马来酸酐改性木质素对聚乳酸/环氧大豆油性能的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2019, 35(10): 61—67.
- LIANG Xiao-lin, LIU Wen-yi, ZHANG Feng-kai, et al. Effects of Maleic Anhydride Modified Lignin on Fully Biobased Poly (Lactic Acid) /Epoxidized Soybean Oil Composites[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2019, 35(10): 61—67.
- [43] PARK S H, KO Y S, PARK S J, et al. Immobilization of Silver Nanoparticle-decorated Silica Particles on Polyamide Thin Film Composite Membranes for Antibacterial Properties[J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 499: 80—91.
- [44] LIU Z Y, QI L B, AN X C, et al. Surface Engineering of Thin Film Composite Polyamide Membranes with Silver Nanoparticles through Layer-by-layer Interfacial Polymerization for Antibacterial Properties[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(46): 40987—40997.
- [45] YUMI J, CORALIA V G, SEONGHYUK K, et al. Characterization and Antibacterial Properties of Nano-silver-applied Polyethylene and Polypropylene Composite Films for Food Packaging Applications[J]. *Food Bioscience*, 2018, 23: 83—90.
- [46] WEI X Q, LI Q Y, WU C L, et al. Preparation, Characterization and Antibacterial Mechanism of the Chitosan Coatings Modified by Ag/ZnO Microspheres[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020: 10605—10615.
- [47] ZHANG Lin, DU Wen-ya, AMIT Nautiyal, et al. Recent Progress on Nanostructured Conducting Polymers and Composites: Synthesis, Application and Future Aspects[J]. *Science China Materials*, 2018, 61(3): 303—352.
- [48] WEI X Q, LI Q Y, HAO H, et al. Preparation, Physicochemical and Preservation Properties of Ti/ZnO/in Situ SiO_x Chitosan Composite Coatings[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(2): 570—577.
- [49] WEI X Q, LI X P, WU C L, et al. The Modification of In Situ SiO_x Chitosan Coatings by ZnO/TiO₂ NPs and Its Preservation Properties to Silver Carp Fish Balls[J]. *Journal of Food Science*. 2018, 83(12): 2992—3001.
- [50] SEYEDPOUR S F, AHMAD R, AHMAD A S, et al. Improved Performance and Antifouling Properties of Thin-film Composite Polyamide Membranes Modified with Nano-sized Bactericidal Graphene Quantum Dots for Forward Osmosis[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, 9(41): 1—38.
- [51] LI S Y, GAO B Y, WANG Y, et al. Antibacterial Thin Film Nanocomposite Reverse Osmosis Membrane by Doping Silver Phosphate Loaded Graphene Oxide Quantum Dots in Polyamide Layer[J]. *Desalination*, 2019, 464: 94—104.
- [52] LI H, LAN W T, SAEED A, et al. Electrospun Polyvinyl Alcohol Film Containing Pomegranate Peel Extract and Sodium Dehydroacetate for Use as Food Packaging[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2019, 22: 1—10.
- [53] MOJTABA K, SEPIDEH H. Intelligent Chitosan/PVA Nanocomposite Films Containing Black Carrot Anthocyanin and Bentonite Nanoclays with Improved Mechanical, Thermal and Antibacterial Properties[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 127: 338—347.
- [54] MARYAM M, SANAM M, RAHIM S, et al. Development of Novel Active Packaging Films Based on Whey Protein Isolate Incorporated with Chitosan Nanofiber and Nano-formulated Cinnamon Oil[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 149: 11—20.