

生物质基食品包装材料研究进展

陈彦荣¹ 张 博¹ 韩颜蓉¹ 王晨宇¹ 杨 瑞² 匡奕山²

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 长沙理工大学化学与医药工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:传统石油基包装材料难以降解的特性引发环境污染与食品安全问题,其中微塑料污染已成为全球性挑战。生物质基食品包装材料因其可再生性、可生物降解性和设计灵活性,成为解决上述问题的重要技术路径。现有食品包装材料在环境友好性、食品安全性和功能多样性等方面还存在不足。文章综述了生物质基食品包装材料的构建策略和应用领域,指出了其内在有效性和不足,并进一步探讨了以多功能和智能化为特征的新型食品包装材料的研究进展。

关键词:食品包装;生物质基包装材料;食品安全;发展趋势

Research progress of biomass-based food packaging materials

CHEN Yanrong¹ ZHANG Bo¹ HAN Yanrong¹ WANG Chenyu¹ YANG Rui² KUANG Yishan²

(1. School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. School of Chemistry and Pharmaceutical Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: The non-degradable nature of traditional petroleum-based packaging materials has led to environmental pollution and food safety concerns, with microplastic pollution emerging as a global challenge. Biomass-based food packaging materials, owing to their renewability, biodegradability, and design flexibility, represent a significant technological pathway to address these issues. Existing food packaging materials still exhibit shortcomings in environmental friendliness, food safety, and functional diversity. This article reviews the development strategies and application domains of biomass-based food packaging materials, highlighting their inherent effectiveness and limitations. It further explores research advances in novel food packaging materials characterized by multifunctionality and intelligent properties.

Keywords: food packaging; biomass-based packaging materials; food safety; development trends

全球食品包装产业正面临前所未有的发展机遇与挑战。全球食品包装市场约占整个包装市场份额的 60%,且仍呈扩大趋势,预计到 2030 年将达到 3.4 万亿美元^[1]。现代食品包装已从单一的“食品容器”保护食品免受外界污染与机械损伤^[2],进化为集保护性(阻隔光线、氧气和水蒸气等)、功能性(抗菌、抗氧化、维持新鲜度和延长保质期)、信息性(智能标签、食品信息和追溯系统)和美学性于一体的解决方案。

目前,食品包装材料体系存在显著的性能差异,使用最多的有纸质材料、塑料、金属和玻璃陶瓷材料 4 类。传

统纸基包装材料原料储量丰富、价格低廉、可回收、可生物降解、可折叠、印刷适应性好,被广泛应用于食品、包装、医药等领域,但其存在阻隔性不足与机械强度低等问题。在美国,2018 年塑料包装和容器的用量达到 1 300 万 t^[1]。2023 年,全球塑料总产量为 4.138 亿 t。塑料包装具有质轻(密度 $<2\text{ g/cm}^3$)、机械性能好(弱于金属和玻璃,强于纸质材料)、有适宜的阻隔性(阻气、防潮、防水等)且易加工和化学稳定性好(有一定的耐酸耐碱性能)等优点,但存在石油资源日益枯竭、难以自然降解、热稳定性差、高温下产生有害物质、有害添加剂(增塑剂)迁移等问题^[3]。

基金项目:湖南省自然科学基金(编号:2023JJ40020,2023JJ30012);国家自然科学基金(编号:32302222)

通信作者:张博(1989—),男,长沙理工大学讲师,博士。E-mail:zhangbo0083@126.com

匡奕山(1990—),男,长沙理工大学讲师,博士。E-mail:kuangyishan@csust.edu.cn

收稿日期:2025-08-02 **改回日期:**2025-10-05

引用格式:陈彦荣,张博,韩颜蓉,等. 生物质基食品包装材料研究进展[J]. 食品与机械,2025,41(10):203-212.

Citation:CHEN Yanrong, ZHANG Bo, HAN Yanrong, et al. Research progress of biomass-based food packaging materials[J]. Food & Machinery, 2025, 41(10): 203-212.

金属包装材料强度高、耐储存和运输、综合保护性能好,加工性能好、可回收,但存在化学稳定性差、金属离子迁移、能源消耗多、质量大、相对成本高等问题。玻璃与陶瓷包装材料的阻隔性强、化学稳定性好、热稳定性高且可重复利用,但存在运输难度大(易碎)、生产能耗高和回收成本高等问题^[4]。

随着环境保护意识的提高和相关环境保护政策日趋严格,加之消费者对食品安全和食品品质的更高追求,传统包装材料的局限性愈发凸显。开发绿色环保、可生物降解、便捷安全、高性能以及智能化的新型食品包装材料就显得非常迫切^[4]。在此背景下,生物质基食品包装材料因其绿色、可再生、可生物降解、生物相容性好、可设计可调控等优势,成为解决传统食品包装材料的关键路径。文章拟综述近年来国内外生物质基食品包装材料的研究进展,旨在为推动食品包装行业的绿色转型和技术升级提供理论指导和实践路径。

1 生物质基食品包装材料的种类及应用

生物质基食品包装材料是以可再生生物质资源(如植物、动物与微生物等有机体及其代谢产物)为原料,通过物理、化学或生物方法加工制成的食品包装材料,具有储量丰富、可生物降解、可再生、生物相容性好、安全、多功能和可设计等特点。生物质基食品包装材料主要包括多糖基、蛋白质基、油脂基、生物质基可生物降解塑料和新型食品包装材料(见图1)。

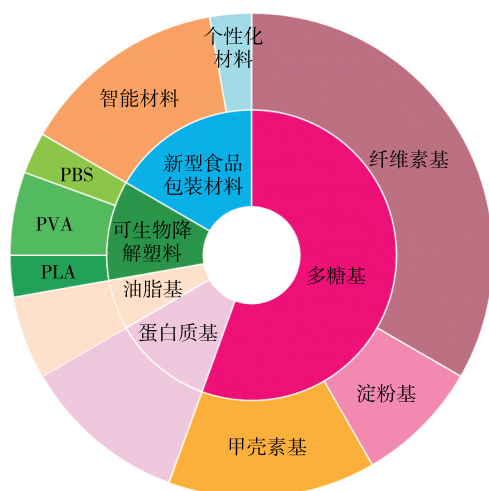


图1 生物质基食品包装材料

Figure 1 The biomass-based food packaging materials

1.1 多糖基食品包装材料

多糖基食品包装材料以天然多糖类化合物为主要原料,是食品包装领域绿色发展的重要方向,被广泛应用于食品保鲜、缓释、智能包装等场景,主要包括纤维素基、淀粉基和甲壳素基材料。

1.1.1 纤维素基食品包装材料 纤维素作为地球上储量最丰富的天然高分子,是构建可持续包装的理想骨架。其在食品包装中的应用历史悠久,从旧石器时代使用芭蕉叶、荷叶、麻绳等包裹食物,到明清时期使用印刷有商标等信息的纸张包裹茶叶和食盐等商品,丰富了包装材料的功能和形式^[4]。现代纤维素基食品包装材料始于20世纪90年代,以改性研究为主,如通过酯化反应引入乙酰基制备醋酸纤维素(CA)薄膜用于油脂类食品包装。近年来国内外聚焦于纤维素与其他功能材料复合,以实现多功能和智能化。但其广泛应用主要受限于两大固有挑战:① 纤维素分子链间强大的氢键网络导致其难溶于常规溶剂,加工成型困难;② 天然的强亲水性使其对水、水蒸气的阻隔性能较差^[5]。因此,近年来的研究核心是围绕如何降低纤维素加工难度、提升其阻隔和机械性能。

根据原料形态与性能特点,纤维素基食品包装材料可分为纤维素基食品包装涂层材料、纤维素食品包装薄膜材料、纤维素衍生物食品包装材料和纤维素基多功能食品包装材料。纤维素基食品包装涂层可以通过表面改性(表面涂布、表面接枝改性)、原位合成等方法提升材料的疏水性、防油性、抗菌性和抗氧化性等。其中,表面涂布操作灵活、易规模化生产,可精准调控涂层功能,但涂层附着易受基材影响、存在溶剂残留等问题。具体的涂布方法分类如图2所示。表面接枝改性可精准调控表面性能(如亲水性、抗菌性和吸附性),对基材表面损伤小,不会影响基材的宏观形态和力学性能,接枝链的化学稳定性高,在极端环境(高温、酸碱)下仍能保持接枝基团的功能。但接枝改性工艺复杂,存在化学试剂残留和污染、成本较高、基材适应性有限等问题。

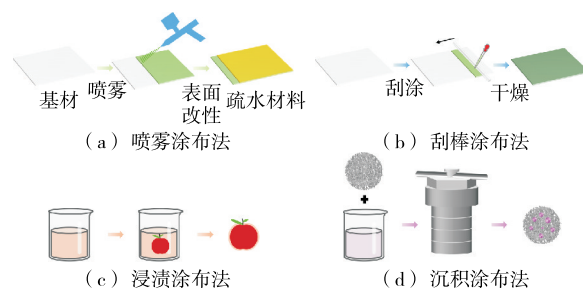


图2 食品包装材料的涂布方法

Figure 2 The coating methods for food packaging materials

针对纸、纸板等现有纤维素基材的表面进行改性,是提升其性能最直接、成本效益最高的途径。Zhang等^[6]通过将肉桂醛(CIN)的乙酰化纤维素溶液涂布于牛皮纸上,制备了高阻隔、高强度、抗菌的食品包装纸。结果表明,当CIN添加量为6%时,涂布纸的抗菌、抗氧化性能最优:干、湿拉伸应力分别提升了26.4, 10.6 MPa,纸张防油等级(即KIT等级)从1级提升至最高级12级,吸水性从

41.8 g/m²降至1.5 g/m²,牛皮纸的水蒸气透过系数(WVP)从 6.9×10^{-12} g·m/(m²·s·Pa)降至 1.3×10^{-12} g·m/(m²·s·Pa),使用涂布纸包装的牛肉保质期至少延长4 d。Huang等^[7]以硬脂酸改性微晶纤维素(MCC)后的疏水微晶纤维素酯和硬脂酸为原料,混合后涂布于蔗渣纤维纸张表面,得到蔗渣纤维涂布纸(MSP)。并进一步将聚六亚甲基胍盐酸盐(PHMG)接枝到MSP表面,得到MSP-g-PHMG食品包装纸,该包装纸具有良好的水蒸气阻隔性能,对大肠杆菌(*E. coli*)和李斯特菌(*L. monocytogenes*)均具有良好的抗菌活性,其抑菌圈直径分别为19.4, 21.5 mm。使用MSP-g-PHMG包装树莓能有效延缓腐败,第3天和第5天的树莓硬度显著高于聚乙烯(PE)膜包装的。上述策略的共性挑战在于涂层与基材结合的牢固程度,以及功能性小分子遇热分解和迁移等问题。

为解决涂层附着力问题,研究者开始探索更深层次的结合方式。比如原位合成可将原位合成产物(如纳米颗粒、纤维)均匀分散至基材中,产物与基材通过化学键(如共价键、离子键)直接结合,附着力强,但存在反应条件苛刻,未反应原料、副产物或催化剂残留,成本高等问题。Huang等^[8]通过原位合成法将Al和Zn分别沉积在甘蔗壳纤维素纤维表面,经月桂酸钠改性得到疏水改性膜,再将CA通过静电纺丝沉积在改性膜表面,得到Zn-Al层状双氢氧化物(LDH)@纤维素膜(CALC)。该膜具有不对称表面结构和润湿性,拥有散热、液体传输、抗菌、屏蔽紫外线等性能,CALC膜对*E. coli*和金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)的抑菌圈直径分别为1.0, 1.4 mm,且CALC膜的太阳光反射率高达95.8%。从表面改性到原位生长,反映了为追求功能层的稳定进行的技术进步,但同时也带来了工艺复杂度和成本的增加,这不利于大规模工业化应用。

纤维素食品包装薄膜常通过溶液浇铸、溶解再生、交联改性、静电纺丝等方法制备得到。其中溶液浇铸工艺简单、易操作,但存在溶剂残留、干燥时间长、生产效率低等问题。溶解再生可通过改变溶解条件和再生工艺调控再生材料的结构与性能(如结晶度、力学强度、阻隔性),但溶剂选择受限、生产成本低,存在溶剂残留等问题。交联改性法能改善薄膜的机械强度、热稳定性和耐溶剂性,引入的功能性基团或添加剂可赋予材料特定功能,但过度交联会使薄膜材料柔韧性下降、易脆化,且常用交联剂(如甲醛、环氧氯丙烷)具有毒性,交联剂残留会限制其在食品领域的应用。静电纺丝法可制备高比表面积超细纤维和薄膜,但成本高、生产效率低,难以大规模应用。

与表面改性不同,溶解再生旨在通过打破纤维素原有的氢键网络,在分子水平上进行重塑,以获得均质的高性能薄膜。Guo等^[9]以离子液体为溶剂,在温和条件下溶解纤维素,分别通过乙醇、甲醇、氢氧化钠和硫酸水溶液

作为凝固浴制备了再生纤维素膜(分别命名为RCMs-1、RCMs-2、RCMs-3和RCMs-4)。结果表明,不同凝固浴下制备的RCMs结构和性能差异明显。其中RCMs-1的热稳定性、机械性能和水蒸气阻隔性能良好;RCMs-4和RCM-1的分解温度分别为178.6, 223.2 ℃,拉伸应力分别为30.4, 56.2 MPa, WVP分别为50, 8.7×10^{-3} g·μm/(m²·d·kPa);RCMs-3的OTR为0。而在溶解再生过程中引入功能组分是重要手段。Imani等^[10]利用离子液体溶解纤维素和碳酸钙,添加烷基烯酮二聚体(AKD)和淀粉,通过溶解再生法制备了再生纤维素—碳酸钙复合薄膜(如图3所示)。结果表明,与未添加AKD和淀粉的再生纤维素膜相比,复合薄膜的WVTR和氧气透过率(OTR)大幅降低,水接触角(θ_{wca})显著增大,耐水性、耐油性和力学性能分别提高了41.52%, 95.33%, 127.33%。在溶解再生过程中进行物理混合或填充是简单、易操作的技术,但存在分散均匀性、界面相分离等问题。

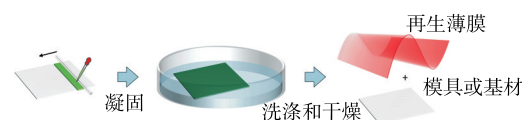


图3 溶解再生法制备食品包装薄膜

Figure 3 The preparation of food packaging film by dissolution and regeneration

通过交联增强纤维素基材与添加剂或颗粒之间的结合力是另一种技术路径。Li等^[11]以环氧氯丙烷(ECH)交联纤维素,添加氧化石墨烯(GO)纳米片,通过交联改性(反应机理如图4所示)制备出具有高水汽阻隔性能和机械性能的再生纤维素纳米复合薄膜。与未交联薄膜相比,含1% GO的复合薄膜的WVP降低了67.4%,而拉伸应力和断裂伸长率分别增至182.8 MPa和5.8%。交联对材料性能提升更明显,但存在化学交联试剂残留、工艺复杂等问题,应用中需要严格控制残留量在安全范围内。

由于纤维素溶解性差,因此以纤维素为原料,通过物理或化学改性得到纤维素衍生物,并进一步制备具有特定功能的材料是纤维素应用的重要方向。这是因为纤维素衍生物通常具有更好的溶解性和成膜性、更容易加工。纤维素衍生物食品包装材料常通过简单共混或溶液浇铸法(如图5所示)制备。简单共混工艺简单、成本低,但存在材料性能(如力学强度、阻隔性等)提升有限、添加剂(如增塑剂、抗菌剂)易迁移等问题。

Zabihollahi等^[12]以羧甲基纤维素(CMC)为基质,添加纤维素纳米纤维(CNF)和菊粉,并进一步负载植物乳杆菌,通过溶液浇铸法制备得到复合膜。结果表明,CNF、菊粉与CMC相容性良好,该复合膜具有良好的水

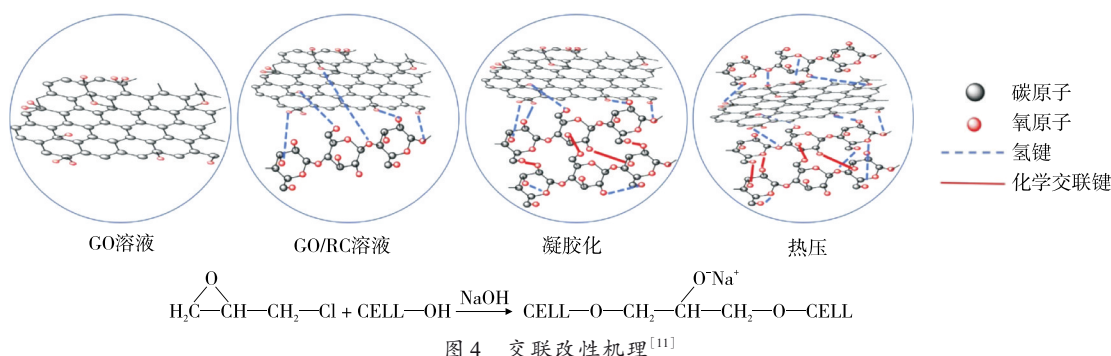


Figure 4 Mechanism of the crosslinking modification

阻隔性能和机械性能。添加菊粉可使益生菌存活率提高 36%，且薄膜对 9 种代表性病原体均具有抗菌活性（抑菌圈直径为 8~14 mm）。在鸡肉包装中，可将保质期从 3 d 延长到 6 d。Di Filippo 等^[13]以蜗牛黏液与羟丙基甲基纤维素（HPMC）或羧甲基纤维素钠（CMC-Na）为原料，混合后溶于水，通过溶液浇铸法制备薄膜。结果表明，添加蜗牛黏液可提高薄膜的伸长率，CMC-Na/蜗牛黏液复合薄膜的伸长率为 67%，远高于 CMC-Na 膜的，降低 HPMC/蜗牛黏液复合薄膜的 WVP，赋予薄膜紫外线屏蔽性能和抗菌活性；添加蜗牛黏液后，薄膜在 200~280 nm 紫外线区域的透光率降至 10% 以下；黏液含量越高，抑菌圈直径越大；薄膜在 2~4 周内，可在土壤中完全降解。上述研究展示了利用生物活性组分与纤维素衍生物协同作用的巨大潜力，为开发功能性包装提供了新思路。但天然功能成分来源稳定性和成本是未来产业化所需考量的重要因素。

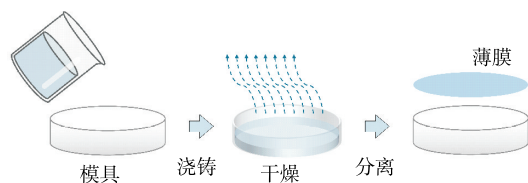


图 5 溶液浇铸法制备食品包装薄膜

Figure 5 The preparation of food packaging film by solution casting

为满足食品包装对疏水性、防油性、抗氧化和抗菌等多功能要求，研究者探索了多种改性策略（简单共混、溶液浇铸法、涂布法、流延法和交联改性等引入功能成分），以实现纤维素基食品包装材料的多功能性。

在提升材料的物理阻隔性与力学性能方面，溶液浇铸法与涂布法是常用技术。Cheung 等^[14]将细菌纤维素（BC）与大豆蛋白混合均匀后，通过溶液浇铸法制备成膜。结果表明，该膜在干态和湿态下均具有优异的机械性能（拉伸应力约 84 MPa，优于商用牛皮纸和低密度 PE）。在 10 cm 深的土壤环境中 1~2 个月内可完全降解。该薄膜透

光性高、耐油性（油渗透试验中，油覆盖在薄膜外部，但未透过薄膜），有望替代传统塑料应用于食品包装。陈方星等^[15]以 CMC、甲基丙烯酸甲酯（MMA）等为原料，采用自由基乳液聚合合法制备 CMC/丙烯酸酯无氟防油剂，通过涂布法制备了含 CMC/丙烯酸酯涂层食品包装纸。当涂布量为 6.0 g/m² 时，防油等级达 12.0 级，且可回收性能良好，纤维回收率可达 94.7%。溶液浇铸更易实现材料整体的均匀性能，而涂布法可设计性强、更加高效和灵活。

在赋予包装生物活性（如抗氧化与抗菌）方面，制备策略则更为多样。Ormanli 等^[16]以纸张为基底，通过电喷雾法将具有抗氧化和抗菌特性的富里酸（FA）与丝胶（S）分别喷涂于纸张表面，得到具有抗菌、抗氧化的食品包装纸。结果表明，当 FA 与丝胶 S 比例为 1:1、质量浓度为 0.8 g/mL 时，包装纸抑菌圈直径达 14.20 mm，且抗氧化活性强于仅喷涂了 S 的包装纸。在 7 °C 和 90% RH 下，该食品包装纸可将梨的贮藏期延长至 90 d，更好地保持梨的色泽、质地且感官评价高。Zorčá 等^[17]在柠檬酸交联的 CMC 中加入了柚子皮粉（PP）、维生素 E、橄榄油（增塑剂）和乳酸链球菌素（Nisin），通过交联改性制备了功能性可食性薄膜。结果发现，添加 Nisin 可增强薄膜抗菌性（对 *E. coli* 的抑菌圈直径 ≥ 5 mm）；当 CMC:PP 为 1:2 时，薄膜抗氧化活性最高，TEAC 值为 130 μmol/g Trolox。电喷雾更适用于表面处理，其功能成分利用率高。而共混交联则适合构建一体化的包装体系，但在配方优化和功能协同上面临挑战（不同功能成分之间可能存在冲突）。

1.1.2 淀粉基食品包装材料 淀粉作为一种储量丰富、成本低廉、可完全生物降解的天然高分子，自 20 世纪 80 年代起，在石油危机与环保思潮的推动下，被广泛应用于食品包装材料。但因淀粉的固有不足：一方面，淀粉分子链上大量羟基导致的强亲水性、吸湿性，在潮湿环境下材料的机械强度与韧性急剧下降，甚至发生溶胀变形；另一方面，分子间强大的氢键作用力使其熔融温度高于分解温度，加工成型困难。这些因素导致未经改性的淀粉基材料通常仅适用于对阻隔性与力学性能要求不高的短保质期食品包装^[3]。目前常可通过涂布法和流延法制备。

通常单一淀粉基材料的性能难以满足要求,研究者常采用共混或交联改性的策略提升其综合性能。Moreno等^[18]以淀粉、明胶为原料,按1:1共混,添加10%月桂酰精氨酸乙酯盐酸盐(LAE),经过160℃高温热压得到非氧化淀粉薄膜(TP);将氧化淀粉、明胶共混,通过涂布法得到氧化淀粉薄膜(OC),并对比探究了其对于4℃下真空包装鸡胸肉品质的影响。结果表明,尽管两种薄膜都能延长鸡胸肉保质期,但其作用机理与效果存在差异:OC薄膜因淀粉氧化促进美拉德反应,在表现出强抗菌性的同时,也加速了脂质氧化,对食品的色泽和pH值产生不利影响;TP薄膜在有效抑菌的同时,能够避免鸡肉的脂质氧化,表现出作为活性包装材料更大的潜力。为增强材料的柔韧性与功能性,Baek等^[19]以豇豆淀粉和智利水果提取物(MBE)为原料,通过流延法制备得到豇豆淀粉/MBE薄膜。结果表明,随着MBE含量的增加,薄膜刚性降低、柔韧性增加,不透明度升高、紫外—可见光阻隔能力增强、抗氧化活性提高。含20%MBE的薄膜对2,2'-联氮-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐(ABTS)和DPPH自由基的清除率分别为88.46%和42.39%。三文鱼包装中,含20%MBE的薄膜能有效延缓其脂质氧化。该薄膜适用于抗氧化包装材料,但因水溶性较高,不适用于高湿性食品包装中。魏鑫鑫等^[20]以淀粉、MAA等为原料,采用自由基聚合法制备水性丙烯酸酯无氟防油剂。涂布后纸张的防油防水性能良好,当涂布量为7.5 g/m²时,KIT防油等级达到10.2级,吸水性降至1.9 g/m²,满足食品防油包装纸要求(KIT等级≥6级),且耐高温、抗冷冻和再制浆性能优良。

1.1.3 甲壳素基食品包装材料 甲壳素是自然界中储量丰富的含氮多糖,其脱乙酰产物壳聚糖(CS)具有优良的生物相容性、生物降解性和广谱抗菌性,自20世纪70年代以来被应用于食品保鲜领域^[21]。其优良的阻隔性在于:聚糖分子链中存在的大量极性羟基和乙酰胺基团形成致密氢键网络,使聚糖分子链紧密排列,减少了分子间的空隙,从而阻碍水、油等小分子的渗透。同时,这些极性基团与水分子在材料表面形成一层水化膜,阻止了水的浸润和渗透。对于油脂等非极性物质,由于极性基团与非极性的油脂分子间的亲和力较弱,且致密的分子排列限制了油脂分子的扩散路径,从而起到防油的作用^[22-23]。随着高效提取甲壳素和化学修饰、共混改性等技术的发展,甲壳素材料的机械强度与阻隔性能显著提升,同时具有抗菌、抗氧化、pH响应等功能的甲壳素智能包装材料不断涌现。然而其规模化应用仍面临原料来源的季节性与地域限制、提取过程成本高且易造成二次污染,以及纯甲壳素膜机械强度低等挑战。常见的制备方法包括涂布法、溶解再生法、接枝改性法、溶液浇铸法和静电纺丝法等。

Abdollahzadeh等^[24]将含游离的纳米波斯阿魏精油的CS直接喷涂至海鲜表面得到纳米CS涂层,探究其对海鲜品质的影响。结果表明,纳米涂层能抑制微生物生长、延缓脂质氧化、保持海鲜色泽和气味。贮藏第15天,处理组的总活菌数为6.8 CFU/g,低于对照组;处理组和对照组的硫代巴比妥酸反应物质值(TBARS)分别为0.37、0.80 mg/kg MDA,该涂层在海鲜的活性包装中有很大的应用潜力。Wu等^[25]将CS接枝到氧化纤维素表面(接枝改性方法如图6所示),通过溶解再生法制备CS/氧化纤维素复合薄膜,该薄膜具有高透明度(>80%)、良好的氧气阻隔性(复合薄膜的OTR均低于未氧化的再生纤维素薄膜)和高抗菌性(对*E. coli*和*S. aureus*的抗菌率均>99%)。香肠包装试验发现,其挥发性盐基氮低于PE保鲜膜包装的。Han Lyn等^[26]将CS和GO共混,通过溶液浇铸法制备CS/GO复合薄膜,并应用于棕榈油基人造黄油的包装。结果表明,引入GO可大幅降低CS/GO薄膜的WVP和OTR(含2.0%GO的复合膜WVP降低约43%、OTR降低约55%),同时提高拉伸强度(添加1.5%CS与2.0%GO的复合薄膜拉伸强度从纯CS薄膜的38.55 MPa提升至62.03 MPa)和抗氧化活性。在人造黄油包装中,CS/GO薄膜能降低人造黄油的TBARS(贮藏30 d,纯CS薄膜、CS/GO薄膜、低密度PE薄膜包装的人造黄油TBARS值分别为0.20、0.05、0.24 mg/kg MDA),说明该薄膜是良好的抗氧化食品包装材料。Rani等^[27]以壳聚糖衍生物(O-CMC)为原料,将O-CMC和果胶混合后加入柠檬酸交联,再添加印楝叶粉末和提取物,通过溶液浇铸法干燥成膜。O-CMC/果胶/印楝复合膜具有良好的机械性能(拉伸强度为7.11 MPa)、良好的抗菌活性(抑菌圈直径为12.0~17.6 mm)、生物降解性好(土壤中填埋75 d即可完全降解)和良好的热稳定性。Duan等^[28]以普鲁兰和羧甲基壳聚糖(CMCS)-Nisin纳米凝胶(CNNGs,抗菌剂)为芯层、CMCS/聚环氧乙烷(PEO)为壳层,通过同轴静电纺丝法制备了核壳纳米纤维。当Nisin质量浓度为8 mg/mL时,纳米纤维具有良好的机械性能(拉伸强度为7.63 MPa,断裂伸长率为10.74%)和优异的抗菌活性(对*S. aureus*和*E. coli*的抑菌圈直径分别为17.70、12.83 mm)。在海鲈鱼保鲜中,该纳米纤维能有效抑制细菌生长、减缓脂质氧化,将保质期从9 d延长至15 d。

综上,3种多糖基材料各具特色与挑战。淀粉基材料凭借原料易得、易改性和易加工等优势,在功能化改性和

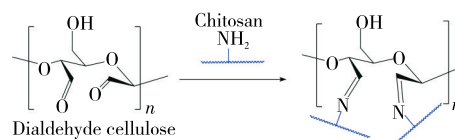


图6 接枝改性方法^[25]

Figure 6 Grafting modification method

应用方面发展迅速,但其固有的亲水性、较差的力学性能仍需持续攻克。甲壳素基材以其天然的抗菌性和优良的阻隔性能脱颖而出,通过改性可实现多功能,但其原料供应的稳定性、提取成本以及环境影响是制约其大规模商业化的主要瓶颈。纤维素尽管存在溶解困难、熔融加工易分解、遇水机械强度急剧降低等问题,但纤维素基材的可设计性强,其进一步发展和大规模应用仍是解决环保问题、绿色食品包装,实现低碳环保、可持续发展的重要方向。

1.2 蛋白质基食品包装材料

蛋白质作为一种来源广泛的天然高分子,其在食品包装领域的应用研究可追溯至 20 世纪初。早期的研究主要集中于利用大豆、小麦等植物蛋白或胶原蛋白、明胶等动物蛋白直接制备基础薄膜。21 世纪,随着纳米技术和生物技术的发展,研究重点转向通过物理、化学或酶法改性,以及与其他功能性物质(如纳米颗粒)复合,以期系统性地提升材料性能。然而,蛋白质基材料的规模化应用仍面临三大挑战:① 固有性质:蛋白质强亲水性导致材料在高湿环境中力学与阻隔性能急剧下降。分子结构在热处理或化学处理中易发生变性,影响材料性能和食品品质。② 成本:高纯度蛋白质原料成本较高,不利于产业化。③ 相容性:蛋白质分子可能发生相互作用,从而影响食品的感官品质。

为应对上述挑战,研究者开发了多种制备和改性方法,如涂布法、溶液浇铸法、流延法和静电纺丝法等。这些方法常与功能化相结合,旨在构筑高性能的多功能包装体系。在涂层保鲜应用中,Jung 等^[29]以蛋清和 CNC 为原料,添加甘油(增塑剂)、姜黄素(抗菌剂)等,混合均匀后通过浸渍涂布或喷涂在新鲜水果表面形成一层可食用的纳米复合涂层。结果表明,涂层不仅具有高透明度、优异的阻隔性和强抗菌性,还可食用、可清洗。该涂层能有效延缓草莓、牛油果、木瓜、香蕉等水果的成熟、脱水和微生物入侵,将货架期至少延长 1 周,为减少食品损耗提供了环保、低成本的解决方案。在生物塑料与废弃物高值化利用方面,Florentino 等^[30]以西班牙鲭鱼切割副产物蛋白和黄百香果果胶为原料,通过溶液浇铸法制备了均匀、柔韧的生物塑料。该生物塑料水溶性低(18.72%)、WVP 低至 $2.29 \times 10^{-13} \text{ g} \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$,在土壤中填埋 15 d 可完全降解,展示了将农业废弃物转化为环保包装材料的巨大潜力。在智能包装领域,Ebrahimi 等^[31]以大豆蛋白(SP)和甲基纤维素(MC)为原料,添加从紫茉莉花瓣中提取的甜菜红素(MJB)和碳点(MJ-CDs),采用溶液流延法制备了智能包装膜。该膜表面光滑、结构均匀,添加 MJB 和 MJ-CDs 后,紫外线阻隔率高达 99.9%,力学性能和阻隔性能也同步提升。在 25 °C 下虾的保鲜中,该薄膜颜色对 pH 和氨气敏感,能通过颜色变化(pH 为 2~6 时呈粉红色,pH>9 时呈棕黄色)实时监测虾类等高蛋白食品的新鲜

度。在抗菌功能化设计上,Liu 等^[32]以明胶、CS 和 3-苯乳酸为原料,通过静电纺丝法得到纳米纤维膜,并吸水制备抗菌水凝胶用于冷藏鸡肉包装。结果发现,负载了 1% 3-苯乳酸的纳米纤维膜中,3-苯乳酸与 CS 形成酰胺键,增强了网络结构,使其吸水溶胀比提升至 2 倍。同时对 *E. coli* 和 *S. aureus* 均可有效灭活,该水凝胶膜可将鸡肉的冷藏保鲜期延长至 4 d。

综上,单一蛋白质材料的性能瓶颈可通过复合与改性策略逐步突破,当前研究热点在于多组分协同作用提升材料性能。例如通过添加疏水成分、抗菌剂或与其他聚合物复合来改善材料阻隔性能、抗菌性能和力学性能。尽管如此,如何平衡性能提升与成本控制,并确保改性过程及添加物不影响食品安全与风味,仍是未来研究需重点解决的问题。

1.3 油脂基食品包装材料

油脂基材料主要包括天然蜡、脂肪酸及其衍生物,其天然的疏水性是构筑食品包装疏水层、阻隔层的关键组分和最大优势。油脂基包装材料能有效降低 WVP,从而在果蔬涂层和生鲜保鲜领域获得广泛应用。然而,纯油脂基材料通常呈蜡状或脆性,缺乏成膜所需的机械强度和柔韧性,因此较少单独使用,常作为功能性添加剂或与其他生物大分子(如多糖、蛋白质)复合形成乳液膜或层压膜。

典型应用是通过构建乳液制备复合薄膜。Rodrigues 等^[33]以牧豆树籽胶和棕榈果油(PFO)为原料,经过超声处理制备油包水型纳米乳液,再通过流延法制备得到可食用乳液薄膜。结果表明,引入 PFO 可提高薄膜疏水性、降低水溶性和 WVP。当 PFO 含量为 0%,20% 时,薄膜的 θ_{wca} 分别为 33.63°, 39.17°, WVP 分别为 1.42, 0.91 $\text{g} \cdot \text{mm}/(\text{h} \cdot \text{kPa} \cdot \text{m}^2)$,该研究清晰地展示了油脂作为功能性疏水组分的核心作用。Ghasempour 等^[34]以乳清蛋白分离物(WPI)和波斯胶(PG)为基材,添加甜菜红素纳米脂质体(NLPs),通过溶液浇铸法制备了纳米复合膜。结果表明,NLPs 的引入降低了复合膜的 WVP,提升了拉伸应力,提高了抗菌活性。

油脂基材料在食品包装中的角色更侧重于“功能助剂”,单一油脂基材料难以满足要求,与亲水性聚合物的复合,可充分利用油脂的疏水性弥补基材的阻水缺陷,同时依靠基材提供必要的力学强度。未来研究的挑战在于优化乳液体系的长期稳定性,并探索更多低成本、来源可持续的天然油脂应用于高性能复合包装材料。

2 生物质基可生物降解塑料类食品包装材料

在日益严峻的塑料污染问题及全球“限塑”政策的推动下,可生物降解包装材料迎来了重要的发展机遇。此类材料通常以天然高分子(如淀粉、纤维素)、微生物发酵产物(如聚乳酸,PLA)或可生物降解的合成聚合物(如聚

丁二酸丁二醇酯(PBS;聚乙烯醇,PVA)为基材,因其环境友好性而备受关注。然而,这类材料普遍存在力学性能不足、气体阻隔性差等固有缺陷,限制了其在高端包装领域的应用。因此,常通过共混、交联及复合等技术手段,来提升其综合性能。同时确保其在特定环境下可被微生物完全降解为无害物质。尽管市场前景广阔,该领域仍面临诸多挑战,主要包括较高的生产成本、与传统石油基塑料尚存的性能差距,以及回收体系不完善、降解条件苛刻等难题。生物质基可生物降解塑料类食品包装材料可通过流延法、改性法、熔融吹塑法制备。

为赋予材料满足食品保鲜需求的多功能特性(如抗菌、抗氧化、紫外屏蔽),研究人员采用了多样化的制备策略。Wang等^[35]通过涂布和吸附自组装技术,在CMC-Na/PVA混合膜表面成功构筑了由宁酸(TA)包覆的纤维素纳米晶体(CNC@TA)和锌离子(Zn^{2+})组成的多功能涂层(Zn -CNC@TA薄膜)。该策略赋予薄膜优异的力学性能、良好的疏水性、高抗菌活性、良好的紫外线阻隔性和高抗氧化性能。在樱桃保鲜中,室温下薄膜包装的樱桃贮藏16 d后质量留存率仍高达87.20%,且无细胞毒性。Li等^[36]则采用流延法,以BC和PVA为基材,添加植酸和二氧化钛(TiO_2),制备了一种基于BC/PVA的多功能包装薄膜。该薄膜具备优异的氧气阻隔性、防水性、防油性、紫外线屏蔽性和抗菌性。在包装鲜切苹果时,抗褐变效果显著,且 TiO_2 迁移量极低。针对不同聚合物相容性差的问题,Zhou等^[37]设计了一种双层结构薄膜。首先将豌豆淀粉(PS)与山梨醇、甘油共混,通过流延法干燥制成PS膜。再将PLA溶液涂布于PS膜表面,构筑了PS/PLA双层薄膜。结果发现,双层结构增强了PS/PLA膜的耐水性、耐热性和水蒸气阻隔性能。与纯PS膜相比,含50% PLA的双层膜、纯PLA膜的吸水率从50.20%分别降低至37.43%,2.95%,在550℃时的质量损失分别从纯PS/PLA双层薄膜的89.87%降低至82.97%,80.54%。纯PS膜的WVP较高,而含50% PLA的双层膜的WVP仅为 $0.27 \times 10^{-10} \text{ g} \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 。此外,为探索工业化应用路径,熔融吹塑法操作简单,高温熔融状态下可促进功能性添加剂(如抗菌剂)在基质中的均匀分散,但热敏性成分易破坏。Aziman等^[38]采用熔融吹塑法,以聚丁二酸丁二醇酯(PBS)和木薯淀粉(TPS)为基材,添加的Biomaster-silver颗粒(BM)作为抗菌剂,制备了抗菌包装薄膜。结果表明,含BM的PBS/TPS薄膜具有小孔隙、高氧气阻隔性和高水蒸气阻隔性。此外,添加3% BM的薄膜对*E. coli*和*S. aureus*均具有强抗菌活性。

综上,通过表面工程、纳米复合、多层结构构建等策略,可以有效克服生物质基可降解生物塑料食品包装材料的性能短板,并赋予其抗菌、抗氧化等多种功能。然而,这些高性能材料的推广仍面临严峻挑战:从经济可行

角度看,复杂的制备工艺和昂贵的功能填料(纳米颗粒、贵金属)阻碍了规模化生产;从食品安全和环境角度看,存在功能性添加剂的潜在迁移风险、真实环境中的可自然降解效率、缺乏健全的回收体系等问题。因此,未来研究应重点关注开发低成本、环境友好的添加剂和高效、可规模化的制备工艺,建立完善的全生命周期评价体系,以科学指导生物质基可降解生物塑料食品包装材料的健康可持续发展。

3 新型食品包装材料的研究进展与发展趋势

在满足基本的保护功能之外,现代食品包装材料正在历经从传统到低碳、可生物降解、多功能、智能化(温湿度感应、智能检测)和个性化定制(根据食品特性与消费者需求设计)的趋势发展,旨在延长食品货架期并实时反馈食品质量信息。通过添加抗菌剂、抗氧化剂等功能组分,主动调节包装微环境以抑制食品腐败。智能化包装则集成传感指示功能,能够响应pH、气体和温度等变化,通过视觉信号(如颜色变化)向消费者直观地传达食品的新鲜度^[39]。为实现上述功能,常采用流延法、溶液浇铸、静电纺丝等技术,将功能性分子或纳米材料负载于生物质聚合物基体中,制备多功能、智能复合薄膜。

(1) 基于流延法和溶液浇铸的智能薄膜。Zheng等^[40]以CS为基材、蓝莓花青素(AN)为pH响应指示剂、CNC为增强剂,通过流延法制备了CS-AN-CNC智能包装薄膜。薄膜可通过颜色变化监测虾的新鲜度(在酸性、中性、碱性条件下,薄膜分别呈砖红色、蓝灰色和灰绿色)。该智能薄膜具有良好的抗菌性(对*E. coli*和*S. aureus*的抑制率分别为76.00%和98.03%)。随着CNC含量的增加,薄膜的抗氧化稳定性增加。薄膜可完全生物降解,在水产保鲜和智能包装领域有应用潜力。Yu等^[41]则聚焦多组分协同增效,通过溶液浇铸法制备了含1%乙酰化纤维素纳米晶体(ACNC)和不同含量(1%~7%)纳米ZnO颗粒的PLA复合膜。结果表明,表面乙酰化改善了ACNC在PLA基质中的分散。当ZnO添加量 $\leq 5\%$ 时,ACNC和ZnO均能均匀分布。此时复合膜的紫外线阻隔性、机械强度、氧气和水蒸气阻隔性能均得到提升,薄膜对*E. coli*和*S. aureus*表现出优异抗菌活性。此外,溶液浇铸还可用于开发防伪包装。Ke等^[42]合成了氨基苝基(HOF-PyTTA)和羧基苝基(PFC-2)两种具有荧光特性的苝基氢键有机框架(HOFs),与乙基纤维素(EC)共混后,通过溶液浇铸法制成复合薄膜。结果表明,复合薄膜在特定角度下呈现荧光变色,为食品溯源与防伪提供了新思路。EC-HOFs复合薄膜具有优异的生物相容性(细胞存活率在90%以上)。当EC与HOF-PyTTA质量比为99:1时,薄膜性能最佳:对660 nm波长的屏蔽率为91.8%,DPPH自由基清除率为32%,拉伸应力为27.8 MPa,是EC薄膜的

1.34 倍。

(2) 基于静电纺丝的纳米纤维智能包装膜。与致密的浇铸膜不同,静电纺丝技术可制备具有高比表面积、高孔隙率的纳米纤维膜(NFMs),这为功能分子的负载和与环境的快速响应提供了有利条件。Ahmed等^[43]采用球形截面自由表面静电纺丝(SSFSE)技术批量制备了用于食品包装的花青素/CS/聚环氧乙烷(PEO)纳米纤维膜(NFMs)(如图7所示)。该膜具有亲水性,对*E. coli*和*S. aureus*均有抑制作用。添加花青素后,NFMs的机械性能提高、抗氧化活性升高,且随pH值从酸性变为中性、再变为碱性,NFMs颜色从白色变为浅黄色、再转变为黄绿色。同样采用静电纺丝,Zou等^[44]通过静电纺丝法制备了负载紫草素(SKN)的季铵化壳聚糖(HACC)/聚己内酯(PCL)纳米纤维薄膜(HACC/PCL/SKN)。结果表明,添加SKN不仅提升了薄膜的疏水性、阻隔性和机械性能,还构建了一个更宽变色范围的pH指示系统(pH从2升至12,薄膜颜色由红色依次变为红紫色、紫色和蓝紫色),能够精准指示鲜虾从新鲜到严重腐败的全过程。添加1%、2% SKN的薄膜 θ_{wca} 分别从纯HACC/PCL膜的53.1°增至56.2°,58.9°,WVP分别从 $2.25 \times 10^{-11} \text{ g} \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 降至 2.18×10^{-11} , $2.12 \times 10^{-11} \text{ g} \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$,薄膜的弹性模量分别从31.37 MPa增至38.62,44.37 MPa。含有2% SKN薄膜的抗菌性良好,对*E. coli*和*S. aureus*的抗菌率分别为70.9%和83.1%,而纯HACC/PCL膜对*E. coli*和*S. aureus*的抗菌率分别为51.8%和68.3%。

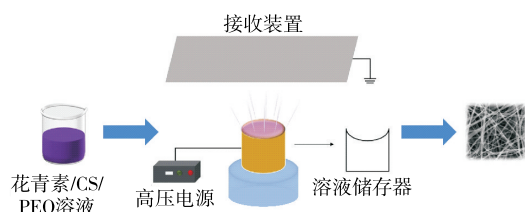


图7 静电纺丝法制备纳米纤维薄膜^[43]

Figure 7 The preparation of nanofiber membranes (NFMs) by electrospinning

除了材料本身的创新,“按需设计”的个性化理念也为新型包装赋予了更丰富的内涵^[45]。黄诗琪^[46]针对老年人等特殊消费群体的包装,分析了其存在的主要问题:信息识别障碍(信息层次不清、缺乏慢性病提示)、包装设计欠缺人性化(操作困难、二次贮藏不便等);探讨了如何运用人工智能技术,优化包装的信息识别性与操作便捷性,实现真正的人性化设计;提出了需遵循信息无障碍、操作便捷性原则,借助AI技术实施五大策略:开发智能信息识别与引导系统、实现个性化定制与情感化设计、提升智能交互与便捷操作、采用环保材料与可持续设计、推动跨领域合作与持续创新,以优化老年人等特殊消费群体使用

体验,满足其健康饮食需求。

综上,新型食品包装材料通过将pH指示剂、抗菌剂、纳米增强体等功能组分整合到生物质基体中,以实现材料多功能化和智能化。这些材料能够实现新鲜度监测、抗菌、抗氧化和防伪等功能。尽管进展显著,但仍存在纳米填料的长期迁移规律及其安全性还有待评估,智能检测指示剂对光和热敏感,指示稳定性和准确性有待检验,生产成本高等问题。未来应着重开发更稳定、多重响应的智能指示体系;系统评估功能添加剂的迁移风险与全生命周期环境影响;并探索兼顾高性能与低成本的规模化制备技术。

4 总结

生物质基食品包装材料作为食品工业可持续发展的关键路径,具有原料来源广、可再生、可生物降解、生物相容性强和可设计等优势,能有效解决传统塑料包装带来的环境污染和食品安全隐患。

尽管生物质基食品包装材料取得了显著进展,但仍面临诸多挑战。① 性能均衡:部分材料性能受限,单一材料难以同时满足高强度、高阻隔、多功能和智能性等要求,需通过多层复合、梯度设计实现性能优化;② 规模化制备:规模化生产技术不成熟,预处理工艺复杂、生产效率低、材料成本高;③ 智能化:智能传感器、智能响应材料的灵敏度和响应稳定性还有待加强;④ 个性化缺乏:基于食品特性和保质期要求的个性化包装解决方案还需大力发展;⑤ 标准和产业体系不完善:行业标准与产业供应—使用—回收体系不完善,阻碍了市场规模化应用。因此,生物质基食品包装材料的发展既要通过进一步深入和系统的研究突破材料设计理论,也需要借助技术创新(开发绿色高效溶剂、发展高效制备工艺、多功能和智能化集成)来实现降本增效、推动产业升级。同时在政府和行业层面,制定扶持政策、完善法规、建立评价标准(性能、安全 and 环境影响),以推动生物质基食品包装材料的高质量、可持续发展和大规模应用。

参考文献

- [1] KAN M Q, MILLER S A. Environmental impacts of plastic packaging of food products[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 180: 106156.
- [2] 付露莹,王锐,张有林. 食品包装材料研究进展[J]. 包装与食品机械, 2018, 36(1): 51-56.
FU L Y, WANG R, ZHANG Y L. Advance in food packing materials[J]. Packaging and Food Machinery, 2018, 36(1): 51-56.
- [3] 魏茂强. 食品接触用塑料制品应用中的质量安全探讨[J]. 中国检验检测, 2024, 32(2): 108-112, 87.
WEI M Q. Discussion on the quality and safety in the application of food contact plastic products[J]. China Inspection

- Body & Laboratory, 2024, 32(2): 108-112, 87.
- [4] 肖东发. 中国印刷图书文化的起源[M]. 北京: 出版科学, 2000: 41.
- XIAO D F. The origins of Chinese printed book culture[M]. Beijing: Publishing Science, 2000: 41.
- [5] ZHOU G W, ZHANG H S, SU Z P, et al. A biodegradable, waterproof, and thermally processable cellulosic bioplastic enabled by dynamic covalent modification[J]. Advanced Materials, 2023, 35(25): 2301398.
- [6] ZHANG J K, GUO Z W, CHEN S, et al. High-barrier, strong, and antibacterial paper fabricated by coating acetylated cellulose and cinnamaldehyde for food packaging[J]. Cellulose, 2021, 28(7): 4 371-4 384.
- [7] HUANG H B, MAO L, WANG W, et al. A facile strategy to fabricate antibacterial hydrophobic, high-barrier, cellulose papersheets for food packaging[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 236: 123630.
- [8] HUANG S S, DENG C, ZHANG H L, et al. Antibacterial cellulose-based membrane with heat dissipation and liquid transportation for food packaging applications[J]. Food and Bioproducts Processing, 2025, 149: 284-293.
- [9] GUO Y L, CAI L, GUO G, et al. Cellulose membranes from cellulose CO₂-based reversible ionic liquid solutions[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021, 9(35): 11 847-11 854.
- [10] IMANI M, DIMIC-MISIC K, KOSTIC M, et al. Achieving a superhydrophobic, moisture, oil and gas barrier film using a regenerated cellulose-calcium carbonate composite derived from paper components or waste[J]. Sustainability, 2022, 14 (16): 10425.
- [11] LI L, ZHOU Z H, YANG B, et al. Robust cellulose nanocomposite films based on covalently cross-linked network with effective resistance to water permeability[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 211: 237-248.
- [12] ZABIHOLLAHI N, ALIZADEH A, ALMASI H, et al. Development and characterization of carboxymethyl cellulose based probiotic nanocomposite film containing cellulose nanofiber and inulin for chicken fillet shelf life extension[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 160: 409-417.
- [13] DI FILIPPO M F, DOLCI L S, LICCARDO L, et al. Cellulose derivatives-snail slime films: new disposable eco-friendly materials for food packaging[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106247.
- [14] CHEUNG K M, JIANG Z L, NGAI T. Edible, strong, and low-hygroscopic bacterial cellulose derived from biosynthesis and physical modification for food packaging[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(13): 6 625-6 639.
- [15] 陈方星, 王玉珑, 魏鑫鑫, 等. 羧甲基纤维素/丙烯酸酯无氟防油剂的制备及在食品包装纸中的应用[J]. 食品与机械, 2025, 41(2): 226-233.
- CHEN F X, WANG Y L, WEI X X, et al. Preparation of carboxymethyl cellulose/acrylate fluorine-free oil-proof agent and its application in food packaging paper[J]. Food & Machinery, 2025, 41(2): 226-233.
- [16] ORMANLI E, AMCA ULUTURK B, BOZDOGAN N, et al. Development of a novel, sustainable, cellulose-based food packaging material and its application for pears[J]. Food Chemistry, 2023, 429: 136719.
- [17] ZORCĂ A G, CHIRA N, ISOPENCU G O, et al. Fabrication of functional edible packaging materials based on carboxymethyl cellulose and pomelo peel powder supplemented with Nisin as active compound[J]. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2025, 10: 100836.
- [18] MORENO O, ATARÉS L, CHIRALT A, et al. Starch-gelatin antimicrobial packaging materials to extend the shelf life of chicken breast fillets[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 97: 483-490.
- [19] BAEK S K, KIM S, BIN SONG K. Cowpea starch films containing maqui berry extract and their application in salmon packaging[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 22: 100394.
- [20] 魏鑫鑫, 王玉珑, 戴洋, 等. 食品包装用水性丙烯酸酯防油剂的制备及应用性能研究[J]. 中国造纸, 2023, 42(3): 47-52.
- WEI X X, WANG Y L, DAI Y, et al. Preparation of waterborne acrylate oil-resistant agent for food packaging and its application[J]. China Pulp & Paper, 2023, 42(3): 47-52.
- [21] 彭俊森, 董晓庆, 田欢, 等. 壳聚糖复合涂膜研究现状及其在果蔬保鲜中的应用[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(1): 61-68, 72.
- PENG J S, DONG X Q, TIAN H, et al. Research status of chitosan composite coating and its application in fruits and vegetables preservation[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2021, 62(1): 61-68, 72.
- [22] WANG Y X, XU T, QI J J, et al. Nano/micro flexible fiber and paper-based advanced functional packaging materials[J]. Food Chemistry, 2024, 458: 140329.
- [23] ROMAN IANA-ROMAN M, NECHITA P, VASILE M A, et al. Barrier and antimicrobial properties of coatings based on xylan derivatives and chitosan for food packaging papers[J]. Coatings, 2023, 13(10): 1 761.
- [24] ABDOLLAHZADEH M, ELHAMIRAD A H, SHARIATIFAR N, et al. Effects of nano-chitosan coatings incorporating with free/nano-encapsulated essential oil of Golpar (*Heracleum persicum* L.) on quality characteristics and safety of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. International Journal of Food Microbiology, 2023, 385: 109996.
- [25] WU Y H, LUO X G, LI W, et al. Green and biodegradable composite films with novel antimicrobial performance based on cellulose[J]. Food Chemistry, 2016, 197: 250-256.
- [26] HAN LYN F, TAN C P, ZAWAWI R M, et al. Physicochemical

- properties of chitosan/graphene oxide composite films and their effects on storage stability of palm-oil based margarine [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 117: 106707.
- [27] RANI S, LAL S, KUMAR S, et al. Utilization of marine and agro-waste materials as an economical and active food packaging: antimicrobial, mechanical and biodegradation studies of O-carboxymethyl chitosan/pectin/neem composite films[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 254: 128038.
- [28] DUAN M X, SUN J S, YU S, et al. Insights into electrospun pullulan-carboxymethyl chitosan/PEO core-shell nanofibers loaded with nanogels for food antibacterial packaging[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 233: 123433.
- [29] JUNG S, CUI Y F, BARNES M, et al. Multifunctional bio-nanocomposite coatings for perishable fruits[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(26): 1908291.
- [30] FLORENTINO G I B, LIMA D A S, SANTOS M M F, et al. Characterization of a new food packaging material based on fish by-product proteins and passion fruit pectin[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 33: 100920.
- [31] EBRAHIMI A, KIANI-SALMI N, TAVASSOLI M, et al. Monitoring food spoilage using smart plant-based packaging materials: methylcellulose/soy protein films loaded with betacyanin and carbon dots[J]. *Future Foods*, 2025, 11: 100610.
- [32] LIU Y N, WANG R, WANG D B, et al. Development of a food packaging antibacterial hydrogel based on gelatin, chitosan, and 3-phenyllactic acid for the shelf-life extension of chilled chicken[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 127: 107546.
- [33] RODRIGUES D C, CUNHA A P, BRITO E S, et al. Mesquite seed gum and palm fruit oil emulsion edible films: influence of oil content and sonication[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 56: 227-235.
- [34] GHASEMPOUR Z, KHODAEIVANDI S, AHANGARI H, et al. Characterization and optimization of persian gum/whey protein bionanocomposite films containing betanin nanoliposomes for food packaging utilization[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2022, 30(7): 2 800-2 811.
- [35] WANG X D, SHEN J, ZHENG D Z, et al. Multifunctional films based on tannic acid-coated cellulose nanocrystals and zinc-coating reinforced sodium carboxymethyl cellulose/polyvinyl alcohol for food active packaging[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 302: 140587.
- [36] LI Y, HAN W J, DING Q J, et al. High-barrier bacterial cellulose/polyvinyl alcohol based active packaging material for food preservation[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2025, 363: 123603.
- [37] ZHOU X M, YANG R D, WANG B, et al. Development and characterization of bilayer films based on pea starch/polylactic acid and use in the cherry tomatoes packaging[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 222: 114912.
- [38] AZIMAN N, KIAN L K, JAWAID M, et al. Morphological, structural, thermal, permeability, and antimicrobial activity of PBS and PBS/TPS films incorporated with biomaster-silver for food packaging application[J]. *Polymers*, 2021, 13(3): 391.
- [39] 孙建明, 李林林, 刘辉, 等. 花青素基复合材料在食品保鲜及新鲜度指示中的应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2024, 40(9): 209-218.
- SUN J M, LI L L, LIU H, et al. Progress on the application of anthocyanin-based composites in food preservation and freshness indication[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(9): 209-218.
- [40] ZHENG D, CAO S M, LI D M, et al. Fabrication and characterization of chitosan/anthocyanin intelligent packaging film fortified by cellulose nanocrystal for shrimp preservation and visual freshness monitoring[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 264: 130692.
- [41] YU F Y, FEI X, HE Y Q, et al. Poly(lactic acid)-based composite film reinforced with acetylated cellulose nanocrystals and ZnO nanoparticles for active food packaging [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 186: 770-779.
- [42] KE Z J, ZHUANG W H, YU J X, et al. Application of pyrene-based HOFs in ethyl cellulose-based food packaging films[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 306: 141383.
- [43] AHMED A, ZHANG M, LI S Q, et al. Batch preparation and characterization of anthocyanin/CS/PEO nanofiber membranes for food packages[J]. *Fibers and Polymers*, 2023, 24(9): 3 075-3 084.
- [44] ZOU Y C, SUN Y F, SHI W J, et al. Dual-functional shikonin-loaded quaternized chitosan/polycaprolactone nanofibrous film with pH-sensing for active and intelligent food packaging[J]. *Food Chemistry*, 2023, 399: 133962.
- [45] 张艳杰. 基于国际奖项案例分析的食品包装版式设计创新趋势[J]. *食品与机械*, 2025, 41(8): 242-248.
- ZHANG Y J. Innovative trends in food packaging layout design based on case analysis of international awards[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(8): 242-248.
- [46] 黄诗琪. 人工智能视域下老年人食品包装中人性化设计研究[J]. *食品安全导刊*, 2024(26): 146-148.
- HUANG S Q. Research on humanized design in food packaging for the elderly in the field of artificial intelligence [J]. *China Food Safety Magazine*, 2024(26): 146-148.