

## 生物基纳米复合食品包装材料的抗菌性研究进展

朱迎澳, 陈倩, 孔保华, 王辉\*

(东北农业大学食品学院 哈尔滨 150030)

**摘要** 因目前使用的食品包装多是不可降解的塑料制品,造成严重的环境污染,故对于可降解食品包装材料的研制和使用迫在眉睫。生物基纳米复合材料是以生物基聚合物为基质,以纳米物质为分散相组成的一类复合材料。这类材料表现出优异的灵活性、生物相容性、生物降解性和较低的成本效益等特点。本文主要介绍生物基纳米复合材料的组成、分类和性能,总结这类生物基纳米复合材料在抗菌方面的优越性及在食品领域中的应用研究进展。

**关键词** 食品包装; 生物基聚合物; 纳米复合材料; 抗菌性

**文章编号** 1009-7848(2024)01-0466-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.01.043

使用适当的包装材料可保护食品免受物理、环境、化学和微生物的危害,进而在保证食品安全、质量以及延长食品货架期等方面发挥重要作用<sup>[1]</sup>。石油基塑料是石油裂解的产物,基于其优异的机械性、稳定性、柔韧性、不透气性、质量轻和易消毒等特性,自 20 世纪中期以来一直是食品包装用的主要材料<sup>[2]</sup>。然而,塑料包装材料的大量使用带来了严重的环境风险<sup>[3]</sup>,因此亟需环保、安全和无毒的包装材料<sup>[4]</sup>。生物聚合物主要是以动、植物为基础的大分子物质,如纤维素、多糖或蛋白质等,因其可被微生物降解,可塑性高,成本低,实用性强,可减少化石燃料的使用而受到广泛关注<sup>[5]</sup>。与此同时,生物基纳米复合包装材料具有良好的机械、热、生物降解、耐化学、抗菌和阻隔性<sup>[6]</sup>。这些材料成本低,易于加工,并且能够延长食品的保质期。此外,为了满足食品在新鲜度、安全性和质量方面的要求,减缓食品腐败变质以及病原性微生物的侵入,抗菌包装成为当下较为常用的手段<sup>[7]</sup>。食品中的抗菌包装是主动包装的一种形式,抗菌剂的使用与被包装的工业产品有着密切联系。在食品接触包装材料中使用抗菌物质,可以抑制微生物的生长,从而提高食品的保质期<sup>[8]</sup>。一般来说,抗菌剂可分为有机抗菌剂和无机抗菌剂。有机抗

菌剂包括酚类物质、卤代化合物、季铵盐和天然生物聚合物,如壳聚糖和甲壳素等<sup>[9]</sup>。无机抗菌剂包括金属纳米颗粒,以及与磷酸盐结合的金属和金属氧化物。通过将金属纳米颗粒掺入聚合物基质中,可以获得具有特殊性能的可用于食品包装的多用途材料<sup>[10]</sup>。这些物质在高温和高压等极端条件下均能维持稳定状态,其中一些被认为是无毒的,甚至还含有人体健康所必需的矿物元素。因此,生物基纳米复合材料在食品包装领域具有广阔的应用前景。

### 1 生物基纳米复合材料的组成

纳米复合材料是由 2 种具有显著不同物理、化学性能的材料组成,其中至少有 1 种成分的尺寸在纳米范围内( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ )。其中起主要作用的成分被称为基质或连续相,分散相/不连续相是增强剂,具有提高基质物理和化学性能的作用。基质是生物基聚合物的纳米复合材料被称为生物基纳米复合材料,并可以根据类型和来源进行分类,如图 1 所示<sup>[11]</sup>。此外,通过在聚合物基质中加入增强剂,可以使成本、线膨胀系数、收缩率和电阻率等下降,减少成型周期,增加导热系数<sup>[12]</sup>。

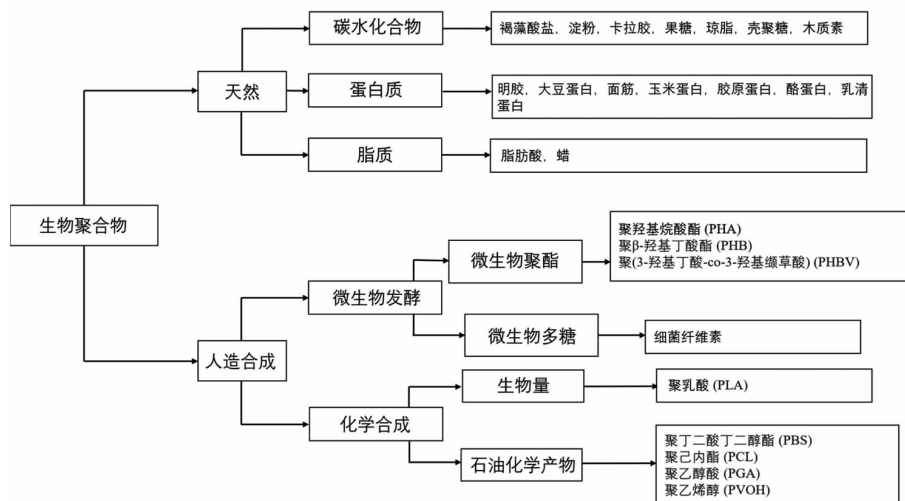
生物基聚合物基质和增强剂可通过一定的成型工艺制备成具有良好机械性能、光学、阻隔性、生物相容性和生物可降解的生物基纳米复合材料,并可用作食品包装薄膜,具有较高的抗菌活性<sup>[13]</sup>。另外,可根据成型工艺及材料组成将这类材料分为层压复合材料(材料由基质黏合剂结合在

收稿日期: 2023-01-20

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2021C048);  
黑龙江省博士后面资助项目(LBH-Z21007)

第一作者: 朱迎澳,男,硕士生

通信作者: 王辉 E-mail: huiwang@neau.edu.cn

图 1 生物聚合物的生产来源<sup>[14]</sup>Fig.1 Sources for production of biopolymers<sup>[14]</sup>

一起)、纤维复合材料(在基质中由增强纤维组成)和颗粒复合材料(由分散在基质中的颗粒组成)。

## 2 生物基纳米复合材料的抗菌性及其在食品包装中的应用

在食品工业中,生物基纳米复合材料是新一代的纳米食品包装材料,在减缓污染微生物生长的同时延长了食品的货架期,其在保证产品贮藏过程中的质量和安全方面具有很高的实用价值。这类材料的性能可根据基质和填料的不同而存在差异。

### 2.1 基于纳米基质的生物基包装材料

多糖具有良好的生物相容性和生物可降解性,与脂类和蛋白质基质相比,多糖可以通过官能团与抗菌物质相互作用得到所需性质,其纤维结构在高温下也能保持很好的稳定性,可以明显提高天然抗菌物质的稳定性和利用率<sup>[15]</sup>。刘旖旎等<sup>[16]</sup>以明胶、壳聚糖为原料,通过静电纺丝技术,制备出一种用于食品包装的可食用纳米抗菌膜。此外,纤维素纳米纤维(CNF)具有质量轻、强度高、气体阻隔性好等特点,被广泛应用于食品包装中。刘双双等<sup>[17]</sup>通过向生物基材料内添加纳米纤维组分,进而形成纳米复合材料。Li等<sup>[18]</sup>通过改性制备反应性疏水CNF膜,并研究其在食品包装中的应用,改性后的CNF薄膜热稳定性和疏水性较好,

且与原始CNF膜相比,其阻隔性能明显改善,水蒸气透过率(WVP)降低了62.4%。Guzman-Puyol等<sup>[19]</sup>用三氟乙酸与三氟乙酸酐混合溶剂处理CNF,并制成食品包装膜,该复合材料的性能取决于纳米纤维素的含量,透明性随着CNF含量的增加而降低,纳米纤维的质量分数在5%~9%之间的复合材料其力学性能最佳,在气体阻隔、水蒸气阻隔、紫外线阻隔、抑菌性能及机械性能等性能上均明显增强。

### 2.2 基于生物可降解基质的纳米复合材料

近年来,可降解生物材料作为传统石油基塑料的替代品已成为解决白色污染问题的最佳手段。其中可降解的水溶性纤维素衍生物包括甲基纤维素、羟丙基纤维素和羧甲基纤维素是开发可降解包装材料的重要基质,然而由于其具有半韧性,需通过选择合适的生物降解基质进一步改善其力学性能<sup>[20]</sup>。Mikel等<sup>[21]</sup>将钴铁氧化物纳米颗粒与甲基纤维素、羟丙基纤维素和羧甲基纤维素钠相结合,制备基于纤维素衍生物的可降解纳米复合材料,在保证优良的柔韧性和降解性之外,其磁性比传统的石油基聚合物也有较大的提升。聚酯是一组易于降解的聚合物,具有特殊的物理力学性能,单元之间的酯键极易水解,因此这些材料在包装领域中得到广泛应用,其中,脂肪族聚丁二酸丁二醇酯(PBS)和聚己二酸对苯二甲酸丁二酯

(PBAT)均具有优良的可降解性,由于其结晶度较低,力学性能不足,限制其应用,因此可以通过将PBAT与其它共聚纳米材料复合,构建分散性、力学性能优异的复合薄膜<sup>[22]</sup>。在 Petchwattana 等<sup>[23]</sup>的一项研究中,他们观察到了 PBS/ZnO 复合膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌均具有较高的抑制活性和优良的降解性能,以及通过溶剂铸造法制备的纳米二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)填充的 PBAT 复合材料<sup>[24]</sup>和 PLA/PBAT/纳米纤维素-银纳米复合物<sup>[25]</sup>也有同样的结果。Danaya 等<sup>[26]</sup>通过吹膜工艺将纳米 ZnO 粉末与热塑淀粉(TPS)复合,制备 PBAT/TPS 共混物,得到一种既可以防腐保鲜,又可以生物降解的活性薄膜作为猪肉包装,有效促进了可生物降解薄膜在食品工业中的应用和商业化。

### 2.3 活性纳米填料的种类及特性

在聚合物复合材料中添加较低含量的纳米填料可以在不影响加工工艺的情况下改善其机械性、阻隔性和可燃性<sup>[27]</sup>。纳米填料包括有机填料和无机填料,无机填料有 SiO<sub>2</sub>、二氧化钛(TiO<sub>2</sub>)、碳酸钙、笼型聚倍半硅氧烷、碳纳米管、埃洛石纳米管或蒙脱土等,而椰壳纤维纳米填料、炭黑和纳米纤维素属于有机纳米填料。可通过静电纺丝、蒸汽涂层、离子注入、溅射和电化学沉积等方法将这些纳米填料结合到聚合物基质中。

**2.3.1 纳米级金属颗粒填料** 纳米级金属复合材料是将纳米级金属颗粒与聚合物结合制成的抗菌活性包装材料,金属或金属氧化物纳米颗粒具有较高的比表面积和表面反应性,相比微观或宏观尺度的等效物表现出更有效的抗菌活性<sup>[28]</sup>。常用的纳米级金属和金属氧化物有 Ag、金(Au)、ZnO、SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、氧化铝和氧化铁等。这些纳米颗粒的抗菌机制主要包括(图 2):1)通过打断跨膜电子转移或破坏/穿透细胞膜,直接与微生物细胞相互作用;2)氧化细胞成分,产生活性氧或可造成损害的溶解性重金属离子等二次产物。基于此,基于纳米金属颗粒的复合材料被广泛用作生长抑制剂、抗菌剂、抗菌剂载体和抗菌剂包装薄膜等。此外,生物基纳米复合抗菌膜主要应用于包括肉、鱼、家禽、面包、奶酪、水果和蔬菜在内的食品贮藏保鲜领域。

重金属作为抗菌剂时,通常是以盐类、胶体和

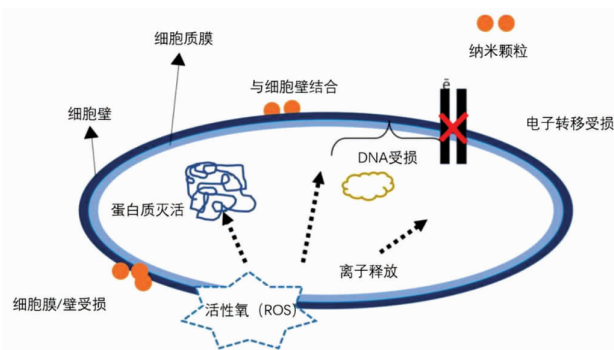


图 2 食品包装中纳米材料/纳米颗粒抗菌机制示意图<sup>[29]</sup>

Fig.2 Schematic diagram of antibacterial mechanism of nanomaterials / nanoparticles in food packaging<sup>[29]</sup>

复合物(银沸石或元素 NPs)等形式存在。当纳米 Ag、铜(Cu)、Zn 和 Ti 被纳入可食品接触的抗菌剂时,可以明显提高材料的机械性能和阻隔性能,并有效防止其光降解<sup>[30]</sup>。纳米 Ag 由于熔点低且易于加工,使得其在食品包装中被广泛应用<sup>[31]</sup>,Cao 等<sup>[32]</sup>通过对含纳米 Ag 的生物基纳米复合膜的研究发现,纳米 Ag 对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌均具有较高的抗菌活性;Sonseca 等<sup>[33]</sup>通过壳聚糖介导绿色合成纳米 Ag,并将其加入到低聚乳酸和聚乳酸基质中,所得到的包装材料的抗菌活性、机械性能和热性能均得到了明显的提升;Ramos 等<sup>[34]</sup>通过释动力学研究百里香酚和纳米 Ag 在 40 °C 下从纳米复合材料释放到水性食品模拟物中,结果显示该活性薄膜不仅具有优良的控释性,并且抗菌、抗氧化性也得到了大幅度提升。Li 等<sup>[35]</sup>采用一步水热法合成具有光热效应的硫化铜纳米颗粒(CuS)后引入到卡拉胶基(Carr)中,得到 Carr/CuS 薄膜比纯 Carr 膜具有更好的透明度、机械性能以及抗菌活性。纳米 Au 颗粒具有无毒的特性,然而由于成本过高,通常用于鱼子酱等高端产品的抗菌保鲜<sup>[36]</sup>。Bumbudsanpharoke 等<sup>[37]</sup>先通过绿色合成方法合成纳米 Au 颗粒,并锚定在木质纤维素纤维基质上,该纳米复合材料的自由基清除率超过 98%,这种复合材料可能成为用于食品保存的抗氧化活性包装的新候选者。

**2.3.2 纳米蒙脱土(MTT)填料** 纳米粘土作为填料被广泛应用于食品包装材料中。在食品包装薄膜中嵌入纳米蒙脱土可以降低材料的气体传输速率,以保持食品的新鲜度,延长食品的货架期。



Jayakumar 等<sup>[38]</sup>采用溶剂浇铸法制备了 MMT 纳米颗粒和脂肽相结合的聚乙烯醇薄膜,不但具有优良的力学性能和水屏障性能,并且对鼠伤寒沙门氏菌和群结腐霉的生长有明显的抑制作用。Jiang 等<sup>[39]</sup>将三叶金丝桃果皮的提取物与 MTT 复合到壳聚糖膜中,试验证明其对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌均有明显的抑制效果。Bourakadi 等<sup>[40]</sup>采用铸造法制备了改性噻苯达唑-蒙脱土/壳聚糖/聚乙烯醇复合膜,发现其对铜绿假单胞菌、金黄色葡萄球菌和大肠杆菌具有良好的抑制活性。Giannakas 等<sup>[41]</sup>也证明 MTT 纳米复合材料对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌具有较强的杀菌活性,这是由有机粘土中的季铵盐基团引起的。结果显示,当按照 44% 亲水性 MTT 钠盐和 53% 有机改性 MTT 的添加量加入时,能够显著提高复合材料的强度、刚性、阻隔性及抗菌活性。

**2.3.3 纳米层状双氢氧化物(LDH)填料** LDH 是一种层状无机固体,作为纳米填料在聚合物纳米复合材料的合成中起到重要作用。当有机分子对 LDH 进行改性后,这些改性的 LDH 基纳米复合材料的机械性能、阻隔性、热稳定性、阻燃性、亲水性、控制药物输送和抗菌活性都得到明显改善<sup>[42]</sup>。Yu 等<sup>[43]</sup>制备了壳聚糖/海藻酸盐覆盖的 LDHs 复合材料,并将其作为一种纳米系统用于输送口服疫苗,首先将镁和铝盐组成的 LDH 通过共沉淀法排列,再水热处理,然后将其作为蛋白质抗原的纳米载体,通过交联剂将壳聚糖覆盖在 LDH/抗原上,帮助其在小肠内吸附和渗透,再进行海藻酸盐涂层,以避免胃酸的侵蚀,其在小肠中的吸收过程如图 3 所示。

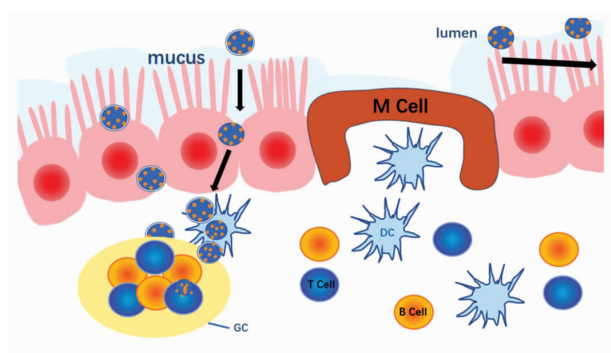


图 3 ALG-CT-LDH 纳米颗粒口服给药过程示意图<sup>[44]</sup>

Fig.3 Schematic diagram of oral administration of ALG-CT-LDH nanoparticles<sup>[44]</sup>

**2.3.4 纳米纤维素填料** 纳米纤维素主要分为纤维素纳米晶体(CNC)、纤维素纳米纤维(CNF)和细菌纤维素。纳米纤维素材料由于其含量丰富,机械性能优良,可再生性强,生物相容性高,以及无毒无害,因而在工业领域中快速发展。Niu 等<sup>[45]</sup>先以松香修饰过的纤维素纳米纤维作为第一层,然后将其掺入到聚乳酸-壳聚糖基质中,将壳聚糖包覆的聚乳酸作为第二层,制备一种双层复合膜,由于壳聚糖和松香的协同作用,该复合膜表现出优异的抗菌活性和机械性能。Abou-yousef 等<sup>[46]</sup>研究了这些纳米复合材料的抗菌活性,发现含有 2% Cu-NPs 的醋酸纤维素(CA)对金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌、白色念珠菌和黑曲霉的抗菌活性最强。Lu 等<sup>[47]</sup>利用过硫酸铵催化共晶溶剂制备功能性纤维素纳米晶体,功能纤维素 II 纳米晶体在明胶基质中起着分子桥接和纳米效应的作用,通过多个氢键与明胶紧密结合,制备出具有优异电响应性和 pH 灵敏的生物基纳米复合膜。除此之外,Chen 等<sup>[48]</sup>以纤维素纳米纤维为薄膜基质,紫甘薯花青素为天然染料,牛至精油为抗菌剂,制备一种可以根据颜色显示判定 pH 的抗菌纤维素纳米纤维包装膜,不仅可以直观的指示食品在贮藏过程中质量的变化,还具有较好的抗菌活性、紫外线和可见光阻隔性能、抗拉强度和较高的弹性。

## 2.4 其它纳米复合材料

壳聚糖 NPs 由于其独特的生物降解性、无毒性和抗菌性能,已成为最有前途的聚合物纳米材料之一。Lin 等<sup>[49]</sup>利用静电纺丝技术制备的壳聚糖纳米纤维- $\epsilon$ -聚赖氨酸生物纳米复合膜,发现这种壳聚糖纳米复合膜不仅能抑制鸡肉表面细菌的增长,还能有效的保持鸡肉的颜色和风味。Vahedikia 等<sup>[50]</sup>通过向壳聚糖纳米粒子中添加玉米醇溶蛋白和肉桂精油来制备天然生物基玉米蛋白薄膜,相比较只添加肉桂精油的薄膜,添加了壳聚糖纳米粒子的薄膜的力学性质和抗菌性能均得到了明显的提升。

淀粉纳米颗粒具有生物相容性、可生物降解、成本效益高、可再生、无毒性等特点。Oliveira 等<sup>[51]</sup>设计了一种将淀粉纳米晶体掺入芒果核淀粉基质的包装膜。与只添加纤维素纳米晶体薄膜相比,其杨氏模量和抗拉强度均有了明显的提升。

纳米杂化复合膜是将有机和无机材料进行结合,可以克服单个纳米颗粒的缺陷,也可以更好的提高复合膜的性能和质量,Mellinas等<sup>[52]</sup>通过微波萃取法,从可可豆壳中提取多酚,再用微波加热法合成ZnO-Zn纳米颗粒,最后通过铸造法制备纳米复合薄膜,该复合膜在热稳定性、抗氧化性、抗菌性、紫外线屏障性均有大幅提升。

### 3 生物基纳米抗菌复合材料应用于食品包装的安全性探讨

随着纳米技术的商业化,纳米复合材料在食品包装中的应用已成为食品工业中发展最快的领域之一。因此,必须尽可能充分地确定它们的安全性和对环境的影响。在工业排放废弃物时,为了防止工业废水中的纳米颗粒进入排水系统,可以通过物理和化学过程进行转化。随着纳米复合包装中与食品接触的纳米颗粒迁移,纳米材料是否能够过渡到包装食品和饮料,以及对人类健康、动物和环境是否存在风险已成为重点关注的问题之一<sup>[53]</sup>。随着纳米复合材料在食品包装材料领域的广泛使用,对其风险评估成为食品安全中的一个重大挑战<sup>[54]</sup>。

### 4 结论及展望

传统的食品包装材料多来源于不可再生的化石资源,面临着处理和回收困难等问题。而生物基纳米复合材料是一种很好的替代材料,因为其可被生物降解,具有成本低、可用性高、有效减少化石燃料的使用等特点,而具有成为合成塑料薄膜替代品的潜力。生物聚合物与纳米填料的结合使可持续环保食品包装的发展成为可能。蒙脱土是合成聚合物纳米复合材料中最常用的填料。各种抗菌剂,如酶(溶菌酶)、纳米金属(Ag、Cu)、金属氧化物、有机抗菌材料等,由于其独特的抗菌活性、热稳定性和低毒性,在包装应用中引起研究人员的广泛关注。根据欧洲食品安全局规定,食品包装中的Ag在水中的迁移上限不能超过0.05 mg/L,在食品中不能超过0.05 mg/kg<sup>[55]</sup>。因此,抗菌药物及其在不同抗菌包装应用中的迁移行为的研究应引起更多的关注。另外,生物纳米复合材料在奶酪、谷物、面包、肉制品、绿豆、番茄、梨、苹果、蘑

菇、瓜类等产品的包装,以及果汁和乳制品的热成型容器,还有水、啤酒和碳酸饮料的包装等方面都有很大的应用前景。此外,利用纳米颗粒将活性包装材料与智能包装材料相结合是该领域未来的研究方向。尤其是高端产品以及长距离运输产品,通过运用智能包装,将传感器与电脑连接,实时监控产品变化,纳米技术与传统包装材料的结合开创了高技术、性能优、多功能的食品包装新时代,不断涌现的新型纳米复合包装使食品品质得以大幅提升,对食品工业的发展也起到了极大的推动作用<sup>[56]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] 张潇予,徐慧,邵磊,等.食品包装材料安全性和检测技术研究[J].食品安全导刊,2021(9):179-181.  
ZHANG X Y, XU H, SHAO L, et al. Research on safety and detection technology of food packaging materials[J]. Food Safety Guide, 2021(9): 179-181.
- [2] 张彤,刘盼,王倩,等.降解石油基塑料的微生物及微生物菌群[J].生物工程学报,2021,37(10):3520-3534.  
ZHANG T, LIU P, WANG Q, et al. Degradation of petroleum-based plastics by microbes and microbial consortia[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2021, 37(10): 3520-3534.
- [3] 戴瑞佳.塑料材料的产生对食品包装设计的影响[J].食品安全导刊,2021(24):116-117.  
DAI R J. The impact of plastic materials on food packaging design[J]. Food Safety Guide, 2021(24): 116-117.
- [4] 白国强.食品用塑料包装产品质量与食品安全[J].食品安全导刊,2021(23):4-5.  
BAI G Q. Product quality and food safety of plastic packaging for food [J]. Food Safety Guide, 2021 (23): 4-5.
- [5] 陈艳欣.多糖膜在食品包装中的应用[J].辽宁化工,2020,49(5):561-562.  
CHEN Y X. Application of polysaccharide film in food packaging [J]. Liaoning Chemical Industry, 2020, 49(5): 561-562.
- [6] 邵平,于江,陈杭君,等.食品包装涂布纸生物聚合物基质分类及应用[J].食品与发酵工业,2020,

- 46(2): 286–292.
- SHAO P, YU J, CHEN H J, et al. Classification and application of biopolymer matrix for food packaging coating paper[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2020, 46(2): 286–292.
- [7] 郭娟, 张进, 王佳敏, 等. 天然抗菌剂在食品包装中的研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(9): 336–346.
- GUO J, ZHANG J, WANG J M, et al. Natural antibacterial agents and their application in food packaging: A review[J]. *Food Science*, 2021, 42(9): 336–346.
- [8] 周成琳, 李志明, 刘海洋, 等. 可降解抗菌包装材料的研究进展[J]. *粮食科技与经济*, 2020, 45(2): 135–136.
- ZHOU C L, LI Z M, LIU H Y, et al. Research progress of biodegradable antibacterial packaging materials[J]. *Grain Science, Technology and Economy*, 2020, 45(2): 135–136.
- [9] 汪晓鹏. 塑料抗菌剂的研究和发展[J]. *西部皮革*, 2021, 43(23): 29–31.
- WANG X P. Research and development of plastic antibacterial agents[J]. *Western Leather*, 2021, 43(23): 29–31.
- [10] SCHMITZ F, ALBUQUERQUE D S B M, ALBERTON D M, et al. Zein films with ZnO and ZnO: Mg quantum dots as functional nanofillers: New nanocomposites for food package with UV-blocker and antimicrobial properties [J]. *Polymer Testing*, 2020, 91: 106709.
- [11] SHARMA R, JAFARI M S, SHARMA S. Antimicrobial bio-nanocomposites and their potential applications in food packaging[J]. *Food Control*, 2020, 112: 107086.
- [12] EGHBALIAN M, ANSARI R, HAGHIGHI S. On the mechanical properties and fracture analysis of polymer nanocomposites reinforced by functionalized silicon carbide nanotubes: A molecular dynamics investigation [J]. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 2022, 111: 108086.
- [13] 李旭飞, 车阳丽, 吕艳, 等. 壳聚糖/无机物纳米复合材料在抗菌方面的研究进展[J]. *材料导报*, 2018, 32(21): 3823–3830.
- LI X F, CHE Y L, LÜ Y, et al. Research progress of chitosan/inorganic nanocomposites in antibacterial field[J]. *Material Guide*, 2018, 32(21): 3823–3830.
- [14] ROSTAMI M, YOUSEFI M, KHEZERLOU A, et al. Application of different biopolymers for nanocapsulation of antioxidants via electrohydrodynamic processes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 97: 105170.
- [15] 于栋, 王浩, 冯灿灿, 等. 静电纺丝技术包埋抗菌物质研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(2): 358–364.
- YU D, WANG H, FENG Y Y, et al. Research progress in embedding antibacterial substances by electrospinning technology[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2020, 41(2): 358–364.
- [16] 刘旖旎, 许晓曦, 刘芳, 等. 静电纺明胶/壳聚糖可食用纳米纤维膜的制备、表征及其抑菌特性研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(24): 180–185.
- LIU Y N, XU X X, LIU F, et al. Preparation, characterization and antibacterial properties of electrospun gelatin/chitosan edible nanofiber membrane[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2020, 41(24): 180–185.
- [17] 刘双双, 李玉磊, 王玉峰. 纳米纤维素增强生物基食品包装材料的研究进展[J]. *天津造纸*, 2021, 43(3): 7–11.
- LIU S S, LI Y L, WANG Y F. Research progress of nano cellulose reinforced bio-based food packaging materials[J]. *Tianjin Paper*, 2021, 43(3): 7–11.
- [18] LI W, WANG S F, WANG W, et al. Facile preparation of reactive hydrophobic cellulose nanofibril film for reducing water vapor permeability (WVP) in packaging applications [J]. *Cellulose*, 2019, 26(5): 3271–3284.
- [19] GUZMAN-PUYOL S, CESERACCIU L, TEDESCHI G, et al. Transparent and robust all-cellulose nanocomposite packaging materials prepared in a mixture of trifluoroacetic acid and trifluoroacetic anhydride[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(3): 368–381.
- [20] 陈子健, 唐艳军, 朱鹏, 等. 羧甲基纤维素的制备及其应用进展[J]. *中国造纸学报*, 2022, 37(3): 144–154.
- CHEN Z J, TANG Y J, ZHU P, et al. Progress in preparation and applications of carboxymethyl cellulose[J]. *Transaction of China Pulp and Paper*, 2022, 37(3): 144–154.
- [21] MIKEL R, MANUEL S, SENENTXU L, et al. Magnetically active nanocomposites based on biodegradable polylactide, polycaprolactone, polybutylene succinate and polybutylene adipate tereph-

- thalate[J]. *Polymer*, 2022, 249: 124804.
- [22] 来蕾. 生物可降解聚己二酸对苯二甲酸丁二醇酯纳米复合材料及性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- LAI L. Study on biodegradable poly (butylene adipate terephthalate) nanocomposites and their properties[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [23] PETCHWATTANA N, COVAVISARUCH S, WI-BOORANAWONG S, et al. Antimicrobial food packaging prepared from poly (butylene succinate) and Zinc oxide[J]. *Measurement*, 2016, 93: 442–448.
- [24] VENKATESAN R, RAJESWARI N. ZnO/PBAT nanocomposite films: Investigation on the mechanical and biological activity for food packaging[J]. *Polymer Advanced Technology*, 2016, 28(1): 20–27.
- [25] CHONG W J, SHEN S, LI Y C, et al. Additive manufacturing of antibacterial PLA–ZnO nanocomposites: Benefits, limitations and open challenges[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 111: 120–151.
- [26] DANAYA P, PHANWIPA W, KHWANCHAT P, et al. Blown film extrusion of PBAT/TPS/ZnO nanocomposites for shelf–life extension of meat packaging[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2022, 214: 112472.
- [27] MULLER K, BUGNICOURT E, LATORRE M, et al. Review on the processing and properties of polymer nanocomposites and nanocoatings and their applications in the packaging, automotive and solar energy fields[J]. *Nanomaterials*, 2017, 7: 74–121.
- [28] TAN K B, SUN D, HUANG J, et al. State of arts on the bio–synthesis of noble metal nanoparticles and their biological application[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2021, 30: 272–290.
- [29] EMAMIFAR A, KADIVAR M, SHAHEDI M, et al. Evaluation of nanocomposite packaging containing Ag and ZnO on the shelf life of fresh orange juice[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2010, 11(4): 742–748.
- [30] LLORENS A, LLORET E, PICOUE T A P, et al. Metallic–based micro and nanocomposites in food contact materials and active food packaging [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2012, 24(1): 19–29.
- [31] HE Y Q, LI H, FEI X, et al. Carboxymethyl cellulose/cellulose nanocrystals immobilized silver nanoparticles as an effective coating to improve barrier and antibacterial properties of paper for food packaging applications [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 252: 117156.
- [32] CAO W L, YAN J H, LIU C, et al. Preparation and characterization of catechol–grafted chitosan/gelatin/modified chitosan–AgNP blend films[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 247: 116643.
- [33] SONSECA A, MADANI S, RODRÍGUEZ G, et al. Multifunctional PLA blends containing chitosan mediated silver nanoparticles: Thermal, mechanical, antibacterial, and degradation properties[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(1): 22.
- [34] RAMOS M, BELTRAN A, FORTUNATI E, et al. Controlled release of thymol from poly (lactic acid)–based silver nanocomposite films with antibacterial and antioxidant activity [J]. *Antioxidants*, 2020, 9(5): 395.
- [35] LI F, LIU Y N, CAO Y Y, et al. Copper sulfide nanoparticle–carrageenan films for packaging application[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 109: 106094.
- [36] PAIDARI S, IBRAHIM S A. Potential application of gold nanoparticles in food packaging: A mini review [J]. *Gold Bulletin*, 2021, 54(1): 31–36.
- [37] BUMBUDSANPHAROKE N, SEONGHYUK K. The green fabrication, characterization and evaluation of catalytic antioxidation of gold nanoparticle–lignocellulose composite papers for active packaging[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 107: 1782–1791.
- [38] JAYAKUMAR A, RADOOR S, NAIR I C, et al. Polyvinyl alcohol–nanocomposite films incorporated with clay nanoparticles and lipopeptides as active food wraps against food spoilage microbes[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, 30: 100727.
- [39] JIANG Y L, YIN H, ZHOU X F, et al. Antimicrobial, antioxidant and physical properties of chitosan film containing *Akebia trifoliata* (Thunb.) Koidz. peel extract/montmorillonite and its application [J]. *Food Chemistry*, 2021, 361: 130111.
- [40] EL BOURAKADI K, MERGHOU B N, FARDIOU M, et al. Chitosan/polyvinyl alcohol/thiabendazolium–montmorillonite bio–nanocomposite films: Mechanical, morphological and antimicrobial properties [J]. *Composites Part B Engineering*, 2019, 172: 103–



- 110.
- [41] GIANNAKAS A, VLACHA M, SALMAS C, et al. Preparation, characterization, mechanical, barrier and antimicrobial properties of chitosan/PVOH/clay nanocomposites [J]. *Carbohydr Polym*, 2016, 140: 408–415.
- [42] 米娇杨. 聚合物修饰的 LDH@Ag 纳米杂化材料的制备及其抗菌性能研究[D]. 吉林: 吉林农业大学, 2021.
- MI J Y. Polymer modified LDH@Ag Preparation and antibacterial properties of nano hybrid materials[D]. Jilin: Jilin Agricultural University, 2021.
- [43] YU X Y, WEN T G, CAO P, et al. Alginate-chitosan coated layered double hydroxide nanocomposites for enhanced oral vaccine delivery [J]. *Colloid Interface*, 2019, 556: 258–265.
- [44] XU T T, ZHANG J, CHI H B, et al. Multifunctional properties of organic-inorganic hybrid nanocomposites based on chitosan derivatives and layered double hydroxides for ocular drug delivery [J]. *Acta Biomaterialia*, 2016, 36: 152–163.
- [45] NIU X, LIU Y T, SONG Y, et al. Rosin modified cellulose nanofiber as a reinforcing and co-antimicrobial agents in polylactic acid/chitosan composite film for food packaging [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 183: 102–109.
- [46] ABOU-YOUSEF H, SABER E, ABDEL-AZIZ M S, et al. Efficient alternative of antimicrobial nanocomposites based on cellulose acetate/Cu-NPs [J]. *Soft Materials*, 2018, 16(3): 141–150.
- [47] LU Q L, WU J Y, LI Y G, et al. Isolation of thermostable cellulose II nanocrystals and their molecular bridging for electroresponsive and pH-sensitive bio-nanocomposite [J]. *Industrial Crops and Products*, 2021, 173: 114127.
- [48] CHEN S L, WU M, LU P, et al. Development of pH indicator and antimicrobial cellulose nanofiber packaging film based on purple sweet potato anthocyanin and oregano essential oil [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 149: 271–280.
- [49] LIN L, LIAO X, SURENDRIRAN D, et al. Preparation of epsilon-polylysine/chitosan nanofibers for food packaging against *Salmonella* on chicken [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2018, 17: 134–141.
- [50] VAHEDIKIA N, GARAVAND F, TAJEDDIN B, et al. Biodegradable zein film composites reinforced with chitosan nanoparticles and cinnamon essential oil: Physical, mechanical, structural and antimicrobial attributes [J]. *Colloids and Surfaces B-Biointerfaces*, 2019, 177: 25–32.
- [51] OLIVEIRA A V, DA SILVA A P M, BARROS M O, et al. Nanocomposite films from mango kernel or corn starch with starch nanocrystals [J]. *Starch-Starke*, 2018, 70(11/12): 1800028.
- [52] MELLINAS A C, JIMENEZ A, GARRIGOS M C. Pectin-based films with cocoa bean shell waste extract and ZnO/Zn-NPs with enhanced oxygen barrier, ultraviolet screen and photocatalytic properties [J]. *Foods*, 2020, 9(11): 1572.
- [53] 郭琳, 李良, 张敬东. 纳米材料在食品包装中的应用探讨 [J]. *食品安全导刊*, 2020(18): 177.
- GUO L, LI L, ZHANG J D. Application of nano materials in food packaging [J]. *Food Safety Guide*, 2020(18): 177.
- [54] 周加彦, 彭晓辉, 熊大伟, 等. 纳米包装材料向食品纳米迁移及影响因素研究 [D]. 山东: 山东省产品质量检验研究院, 2018.
- ZHOU J Y, PENG X H, XIONG D W, et al. Study on the migration of nano packaging materials to nano food and its influencing factors [D]. Shandong, Shandong Institute of Product Quality Inspection, 2018.
- [55] GAN I, CHOW W S. Antimicrobial poly (lactic acid)/cellulose bionanocomposite for food packaging application: A review [J]. *Food Pack Shelf Life*, 2018, 17: 150–161.
- [56] 何依谣, 张萍, 高德. 纳米复合材料在食品包装中的应用及研究现状 [J]. *化工新型材料*, 2018, 46(1): 196–199.
- HE Y Y, ZHANG P, GAO D. Application and research status of nanocomposites in food packaging [J]. *New Chemical Materials*, 2018, 46(1): 196–199.



## Research Progress on Antibacterial Properties of Bio-based Nanocomposite Food Packaging Materials

Zhu Yingao, Chen Qian, Kong Baohua, Wang Hui\*

(College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030)

**Abstract** In recent years, using non degradable plastic as food packaging material has been resulted in serious environmental pollution. Thus, it is urgent to develop and use degradable food packaging materials. Bio-based nanocomposite is a kind of composite material, which is composed of bio-based polymers as matrix and nano materials as dispersed phase. This kind of material exhibits superior flexibility, biocompatibility biodegradability and low cost-effectiveness. This paper mainly introduces the composition, classification, and properties of bio-based nanocomposites, and summarizes the advantages in antimicrobial property of this kind of nanocomposite and its research progress in the field of food.

**Keywords** food packaging; bio-based polymer; nano-composites; antimicrobial property