

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80146

纳米材料在食品保鲜和包装中的应用进展

周 煌 彭卫福 郭 琪 周宁萍

(吉安职业技术学院现代农业与食品学院,江西吉安 343000)

摘要: 纳米材料凭借其优异的抗菌性、机械性能、稳定性及智能监测功能,长期主导食品包装的创新,被视为传统食品包装和保鲜材料的潜力替代品。综述系统探讨了纳米材料在食品安全和保鲜包装中的应用,重点介绍了最新进展、集成技术的应用现状以及面临的技术瓶颈,同时指出了当前研究的局限性,并展望了食品包装纳米技术的未来方向。

关键词: 纳米材料;食品保鲜;食品包装;纳米复合物;纳米酶

Research progress on nanomaterials in food preservation and packaging

ZHOU Huang PENG Weifu GUO Qi ZHOU Ningping

(School of Modern Agriculture and Food, Ji'an College, Ji'an, Jiangxi 343000, China)

Abstract: Nanomaterials, distinguished by their exceptional antimicrobial properties, mechanical performance, stability, and intelligent monitoring functions, have long driven innovation in food packaging and are regarded as promising alternatives to traditional food packaging and preservation materials. This review systematically discusses the application of nanomaterials in food safety and preservation packaging, with a focus on recent advances, the current status of integrated technology applications, and the technological bottlenecks encountered. It also highlights the limitations of current research and looks ahead to the future direction of nanotechnology in food packaging.

Keywords: nanomaterials; food preservation; food packaging; nanocomposites; nanoenzyme

食品工业面临的最大挑战之一就是确保食品的质量与安全。由于食品在生产、运输和贮藏等过程中受到温度、湿度、微生物污染、物理损伤、化学污染等物理、化学和生物因素的影响而变质。为降低损失并维护消费者健康,亟需采取有效措施以延缓食品腐败并维持其品质。山梨酸钾、苯甲酸钠等食品添加剂可以通过抑制微生物繁殖或减缓食物的氧化反应来延长食品保质期^[1],因此被广泛应用。除了使用食品添加剂,还可以通过食品包装调控食品贮藏的环境,如隔绝空气、防止冷害、减少水分流失等^[2]。近年来,合成塑料因其广泛的来源、低廉的成本以及优异的机械性能(如抗拉强度和抗撕裂性)而得到了广泛应用,主要包括聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚氯乙烯(PVC)、聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)

以及聚酰胺(PA)等^[3]。然而,由于它们的不可回收性和对生态环境的负面影响,其使用正面临越来越多的限制^[3]。在此背景下,纳米材料为食品包装创新提供了突破性解决方案:通过机械性能、抗菌性能等纳米特性调控,实现功能—结构—可持续性的协同优化。

纳米材料是指至少在一个维度(长、宽、高)上尺寸处于1~100 nm范围内的材料。由于其极小的尺寸和极高的比表面积,纳米材料会表现出与宏观材料显著不同的物理、化学、生物特性,如优异的强度、化学稳定性、热性能和机械性能^[4-5]。这类材料可根据结构和功能分为零维(0 D)纳米颗粒、一维(1 D)纳米管或纳米线、二维(2 D)纳米片和三维(3 D)立体结构,其性质随结构变化而不同^[6]。还有环境友好型生物纳米材料也正成为可持续包

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(编号:GJJ181362);吉安职业技术学院科研创新平台“江西省井冈山蜜柚技术创新中心(吉安职院分中心)”资助项目(2023年度立项)

通信作者: 周煌(1988—),女,吉安职业技术学院讲师,硕士。E-mail:zhouhuangja@163.com

收稿日期: 2025-02-25 **改回日期:** 2025-06-29

引用格式: 周煌,彭卫福,郭琪,等. 纳米材料在食品保鲜和包装中的应用进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 226-234.

Citation: ZHOU Huang, PENG Weifu, GUO Qi, et al. Research progress on nanomaterials in food preservation and packaging[J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 226-234.

装领域的研究热点,这类材料以微生物(如细菌纤维素)或植物源(如淀粉纳米颗粒)的天然代谢产物为前驱体,构建具有有序纳米结构的复合材料^[7]。其核心优势在于:显著可降解性——在自然环境中可通过微生物作用高效分解。近年来,在食品包装领域,纳米材料通过增强耐温性、耐用性、耐腐蚀性等性能,提供了优于传统包装材料的优势,兼具成本效益和可持续性^[8]。尽管纳米材料在智能包装、活性包装等领域展现革命性潜力,其产业化仍面临三重瓶颈:① 迁移安全性——体外消化模型显示;② 环境归趋;③ 规模化生产。因此,开发仿生绿色合成工艺(如漆酶介导的纳米纤维素原位组装)、建立全生命周期评估(LCA)模型以及构建纳米材料—食品组分相互作用数据库,将成为该领域未来研究的重点方向。研究拟综述不同结构的纳米材料(零维纳米颗粒、一维纳米管或纳米线、二维纳米片和三维立体结构)、生物纳米复合

物(多糖、蛋白质和脂质)以及纳米酶制备的高性能纳米复合材料,旨在为开发基于生物安全性和可持续性的食品包装纳米材料提供指导。

1 食品行业中的纳米材料

纳米技术在多个工业领域,尤其是食品行业中,展现出了巨大的潜力。纳米材料的功能在很大程度上取决于它们的结构(表1),通常应用于食品行业中的非生物来源的纳米材料主要包括:0 D纳米粒子,如银纳米颗粒,通常用作食品包装中的抗菌剂^[9];1 D纳米纤维通常用于改善食品包装的机械性能^[10];2 D纳米片用于提高食品包装的屏障性能^[11];3 D纳米结构可用于吸收气体分子^[12](图1)。然而,尽管纳米技术带来了诸多益处,也必须认识到其应用过程中可能存在的限制,包括遵守相关法律法规、确保生产安全、评估潜在风险,以及进行深入的毒性和安全性研究。

表1 食品行业中的工程纳米材料

Table 1 Engineering nanomaterials in the food industry

种类	典例	定义	功能	参考文献
0 D	银纳米颗粒	3个维度(长、宽、高)均处于纳米尺度(1~100 nm)	抗菌性能	[9]
1 D	碳纳米管	2个维度在纳米尺度(1~100 nm),另1个维度为宏观尺度(通常为长度)	机械性能	[10]
2 D	纳米黏土	1个维度在纳米尺度(1~100 nm),另外两个维度在宏观尺度	屏障性能	[11]
3 D	金属有机骨架	3个维度均不在纳米尺度,但由纳米尺度的结构单元(0 D、1 D或2 D纳米材料)组装而成	智能包装	[12]

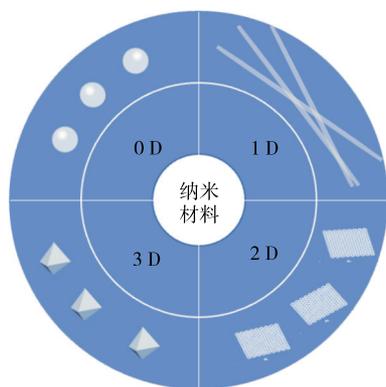


图1 食品包装中的纳米材料结构^[6]

Figure 1 Nanomaterial structures in food packaging

1.1 0 D纳米材料

0 D纳米材料指的是3个维度(长、宽、高)均处于纳米尺度(1~100 nm),形状通常为球形、立方体等对称结构。其中金属/金属氧化物纳米粒子、量子点和二氧化硅纳米颗粒等都可用于食品包装,以保持食品新鲜度或提高包装的抗菌性能或阻隔性能^[9,13-14]。如银纳米粒子具有优异的抗细菌、抗真菌、抗酵母和抗病毒特性,在新鲜水果、

肉类、海鲜等食品包装行业的应用非常广泛^[8,15]。微生物细胞膜中发现的带负电荷的官能团与银纳米粒子中的 Ag^+ 离子结合,增加了膜的渗透性,破坏了细胞运输机制,导致细胞死亡。此外,Mikhailova^[16]发现进入细胞质的 Ag^+ 离子可能会损害DNA、RNA、肽形成物质和代谢酶,从而阻碍微生物呼吸和细胞分裂。杨颖等^[17]将银纳米粒子作为抗菌剂加入壳聚糖季铵盐基质中制备全生物基可降解复合膜用于圣女果保鲜,能有效减缓果实质量、硬度以及营养成分含量下降的速率。另外,氧化锌纳米粒子、二氧化硅纳米粒子都具有很好的稳定性,可以涂覆或掺入聚合物基质中抑制导致食物变质的细菌和病毒,增加材料的机械强度和刚度,增强塑料包装材料的稳定性^[8,18]。量子点因其光致发光特性被用于食品质量监测,并具有抗菌和紫外线阻断性能,可以作为功能填料掺入到包装中^[13,19-20]。

1.2 1 D纳米材料

1 D纳米材料是指两个维度在纳米尺度(1~100 nm),另一个维度为宏观尺度(通常为长度),形状通常为线状或棒状(纳米线、纳米管)。诸如碳纳米管,它可以作为防

止生物、化学和物理污染的屏障,延长产品的保质期^[21],同时碳纳米管还具有抗菌性能,这有助于抑制危险微生物的生长来提高食品的安全性^[22],Dias等^[23]使用碳纳米管和异硫氰酸烯丙酯掺入纤维素基薄膜中制作了一种包装鸡肉的薄膜,研究表明,质量浓度 $>28\text{ g}/100\text{ mL}$ 的异硫氰酸烯丙酯和质量浓度 $>0.02\text{ g}/100\text{ mL}$ 的碳纳米管会明显降低微生物污染。金属纳米线(如银纳米线、金纳米线、铜纳米线)是另一类重要的1D纳米材料,其高导电性和抗菌活性使其适用于电化学传感器(如食品质量监测)和食品保鲜领域,例如利用丝素纤维作为基材,负载聚苯胺/银纳米线作为气体传感器,用于检测猪肉的新鲜度^[24-25]。

1.3 2D纳米材料

2D纳米材料是指一个维度在纳米尺度,另外两个维度在宏观尺度,形状通常为片状或薄膜状,厚度为纳米级。在食品行业中常见的2D纳米材料有纳米黏土、氮化碳等。纳米黏土具有独特的片层结构、柔软的质地、低比重和高纵横比,使其成为各种食品生物包装的理想候选材料^[11]。目前,基于纳米黏土的活性薄膜和涂层正被用于延长易腐、高水分食品的保质期。通过将纳米黏土与生物提取物结合,制备出具有高效阻隔性能、抗氧化和抗菌活性的纳米复合材料。同时,纳米黏土还能够显著改善薄膜的机械性能、阻隔性能和热性能^[26-27]。氮化碳的高硬度、耐久性和低导热性确保了其在食品包装中的应用潜力,Ni等^[28]通过一步静电自组装法制备出具有可见光自激活特性的壳聚糖/负电荷石墨氮化碳生物纳米复合薄膜,该材料对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率分别为 $(99.8\pm 0.26)\%$ 、 $(99.9\pm 0.04)\%$,展现出较高的抗菌活性,可将柑橘保质期延长至24d,同时低成本的石墨氮化碳的复合显著提升了壳聚糖薄膜的机械强度、热稳定性及疏水性能。

1.4 3D纳米材料

3D纳米材料是指3个维度均不在纳米尺度,但由纳米尺度的结构单元(如0D、1D或2D纳米材料)组装而成的材料,结构复杂,通常为多孔或分层结构。典型的金属有机骨架就是一种新型的、高度多孔的3D纳米材料。它通常由金属离子和刚性有机配体组成。由于其高孔隙率和众多结合位点,在食品智能包装方面是一个热门的研究热点。如Feng等^[29]成功开发了一种新型海藻酸钠基智能活性包装薄膜,通过将具有氨敏和抗菌功能的钴基金属有机骨架纳米粒子均匀分散于海藻酸钠基质中,显著提升了薄膜的机械性能、热稳定性、紫外线屏蔽和水蒸气阻隔能力,并展现出优异的抗菌活性和氨敏变色特性,可有效监测虾类食物的腐败过程,具有作为活性智能食

品包装材料的应用潜力。此外,金属有机骨架还可以用于与花青素分子相互作用以提高其稳定性^[12]。与金属有机骨架类似,共价有机框架也显示出可调的多孔框架,该框架由硼、碳、氮、氧或硅元素形成的共价键连接^[30]。同样,由于其多孔性,共价有机框架可用于嵌入一些活性成分,用于食品智能包装中活性成分的控制和释放^[31]。

总而言之,纳米材料在食品包装中所实现的功能与其结构息息相关,0D纳米材料具有优异的抗菌性和阻隔性能,可延长食品保鲜期并用于质量监测,但其潜在安全性仍需进一步验证。1D纳米材料凭借高导电性和抗菌活性,适用于智能传感器开发与食品防腐,但高长径比结构可能带来分散性挑战。2D纳米材料通过片层结构显著提升包装的机械与阻隔性能,且能结合天然提取物实现多功能活性包装,但大规模制备的均一性仍需优化。3D纳米材料凭借多孔特性支持智能监测与活性成分控释,在延长保质期的同时实现腐败实时检测,但复杂合成工艺可能限制其实际应用。总体而言,不同维度纳米材料通过功能化设计为食品包装提供了抗菌、阻隔与智能化潜力,但需在安全性、制备成本及规模化生产方面持续改进。

2 食品行业中的生物纳米复合物

近年来,公众对环保型包装材料的关注焦点已从传统的可回收材料延伸至可生物降解领域。在此背景下,食品包装行业正面临着双重挑战:既要满足消费者对便利性和便携性的使用需求,又要实现环境友好型的可持续发展目标。这种需求导向促使研究者将目光投向生物来源的天然聚合物领域,其独特的可降解特性使其成为突破当前技术瓶颈的关键研发方向。同时,开发新型包装材料还需确保其加工工艺不会影响食品的感官特性、营养成分和整体品质。要实现这些目标,深入理解相关改进措施的物理化学基础至关重要。生物纳米复合材料是一类多相纳米结构材料,含有一种或多种生物来源的成分和至少一个维度在1~100nm范围内的颗粒^[32]。构建生物纳米复合材料的目的是构建一种先进的包装基质,展示生物纳米复合材料在提高机械、阻隔、热和抗菌性等方面的性能,同时对环境友好^[8]。因此,生物纳米复合材料在食品包装领域需要满足多项关键性能要求。首先,这类材料必须具备良好的尺寸稳定性和优异的机械强度,以确保在加工、贮藏、运输等环节中能够有效抵御各种应力,从而为食品提供可靠的保护。其次,理想的生物纳米复合材料应具备优异的气体阻隔性能,能够有效阻挡水分、二氧化碳和氧气等气体的渗透,从而防止食品发生氧化变质。同时,材料的光学性能也至关重要,需要具备足够的光稳定性以保护食品成分免受光降解的影响。在开

发过程中,包装材料的色泽、透明度及清晰度等光学特性都需要被纳入考量范围。通过整合这些优异特性,生物纳米复合材料有望为食品包装行业带来革命性的变革。这种新型材料不仅能够提供更具可持续、更安全的包装解决方案,还能在保持优异包装性能的同时,推动食品包装行业向更环保的方向发展。食品行业中常见的生物纳米材料包括多糖基纳米材料(纳米纤维素、纳米淀粉)、蛋白质基和脂质基纳米材料^[33-35]。

2.1 多糖基纳米材料

2.1.1 纳米纤维素 纳米纤维素是由纤维素纤维分解产生的,纤维素中的分子内和分子间氢键赋予其高拉伸和机械强度,这种抗拉强度、柔韧性的增加促进了更好的食品保存。此外,纳米纤维素复合材料的发展扩大了开发性能改进的复杂食品包装材料的潜力。纳米纤维素与其他材料复合时,能够显著提升复合材料的热性能、机械性能和阻隔性能^[36]。其独特的结构特性使其能够与聚合物通过氢键作用形成致密的网络结构,且网络孔径极小,这种特殊的结构使纳米纤维素具备了优异的气体阻隔性和防潮性能^[37]。Bideau等^[38]研究表明,在纸板表面涂覆TEMPO氧化纤维素纳米纤维和聚吡咯,显著提升了纸板的机械性能,这种增强效果主要源于纤维素纳米纤维中羧基和氢键的协同作用。此外,Koppolu等^[39]也成功开发出一种采用聚乳酸耦合纳米纤维素涂层纸板,结果显示,与单纯聚乳酸涂层纸板相比,这种新型复合材料的阻隔性能得到显著改善:水蒸气透过率降低了23%,透氧率更是大幅降低了98%。尽管这些研究为开发高性能纸基包装材料提供了新的思路,但也需要更多的研究来解决与食品包装中纳米纤维素的大规模制造和实施相关的问题。

2.1.2 纳米淀粉 在众多天然材料中,淀粉作为一种植物来源的材料,不仅价格低廉,还具有生物可降解性、无毒性和生物相容性等优异特性。从化学角度来看,淀粉由2种多糖组成:线性直链淀粉和支链淀粉^[40-41],它们连接形成具有非结晶结构的颗粒,存在3种多晶型淀粉(A型、B型和C型),它们存在于不同的作物中,并在反应性方面略有不同^[42]。在纳米技术领域,淀粉主要呈现2种形式:淀粉纳米颗粒和淀粉纳米晶体。淀粉纳米晶体通常通过酸水解去除淀粉颗粒中的无定型部分获得,而淀粉纳米颗粒则多为具有可变晶体结构的球形或块状纳米颗粒。将微米级淀粉颗粒转化为纳米颗粒的方法多样,包括化学方法(酸水解、酶水解)和物理方法(超声波处理、机械处理、纳米沉淀等)^[43]。Podgorbunskikh等^[44]研究表明,木薯淀粉在温和条件下通过酶水解生产淀粉纳米颗粒和葡萄糖浆,酶水解后得到的上清液可用于生产葡萄

糖浆,生成的纳米淀粉颗粒与天然淀粉复合制成的淀粉薄膜在制备可生物降解和可食用包装材料方面具有良好性能。然而,这类材料也存在一些亟待解决的问题,如显著的亲水性导致防潮性能差、机械性能不足、水稳定性低、高湿敏性、室温脆性以及高含水量等缺陷^[45]。这些优缺点共同构成了淀粉基材料在食品包装应用中的机遇与挑战。

2.2 蛋白质基纳米材料

蛋白质在食品包装中具有重要作用,这归功于其持水持油以及乳化性能。此外,它们还具有抗氧化、抗真菌和抗细菌活性^[46]。在食品包装领域展现出广阔应用前景的天然来源的蛋白质具有显著多样性,主要涵盖以下类别:豆科植物(豌豆、大豆等)、绿叶植物(苜蓿、甜菜等)、油料籽实(向日葵、花生、芝麻等)、坚果类(花生、核桃、杏仁等)、谷物类(玉米、小麦、大米等)等类别^[47],这类生物大分子具有独特的多级结构、可控孔隙率及优异的加工性能^[48]。通过简单的物理或化学改性即可实现高效成膜,展现出显著的功能特性。其多肽链间的分子作用机制可协同增塑剂、生物活性成分、纳米填料及防腐剂等组成,构建具有三维交联网络的结构体系。该网络不仅提供丰富的分子结合位点,更能通过界面效应构筑起有效屏障,阻隔氧气、水分及微生物的侵袭,从而维持包装内容物的品质稳定性^[49]。蛋白基膜通常亲水性强,水分阻隔性能差,但氧气阻隔性良好。如玉米醇溶蛋白因其两亲性成为合成聚合物的理想代替材料。Mushtaq等^[50]开发了含石榴皮提取物的玉米醇溶蛋白膜,用于延长奶酪的保质期,该膜具有优异的水阻隔性、拉伸强度、柔韧性及抗氧化抗菌活性。小麦面筋因成本低,易得性成为生物聚合物开发的理想材料。Deepika等^[48]将面筋与聚乙烯醇结合制备复合膜,发现面筋的加入提升了聚乙烯醇的降解性和机械性能。可食用涂层定义为直接涂覆于食品表面的液态可降解材料,通过阻隔氧气、微生物、水分等保护食品,Salajegheh等^[51]开发了壳聚糖/玉米醇溶蛋白涂层,显著抑制了椰枣中的黑曲霉生长。Mahfoudhi等^[52]采用杏仁胶和阿拉伯胶复合用于樱桃表面涂层,有效降低乙烯生成延缓成熟。蛋白基纳米材料用于食品行业能够显著提升包装性能,延长食品保质期,减少浪费。生物降解性评估证实蛋白基材料在环境中可快速降解,减少污染。尽管其应用前景广阔,仍需深入评估纳米材料在食品中的迁移机制,以推动其在食品工业中的规模化应用。

2.3 脂质基纳米材料

脂质是由磷脂、胆固醇等分子构成的具有仿生膜结构的封闭囊泡体系,当脂质分散于水相介质时,在疏水作

用驱动下,其疏水基团会自发聚集,同时亲水基团也相互聚集^[53]。脂质基体纳米材料通过模拟天然生物膜的双分子层结构,能够高效包封活性成分,不仅显著提升活性成分生物利用度并维持其功能完整性。食品级纳米脂质体具有良好的稳定性、安全性和生物利用度高等优点,因此越来越被大家所关注。例如丁香油虽对金黄色葡萄球菌展现出抗菌活性,但其化学性质不稳定,Cui等^[54]采用纳米脂质体技术对丁香油进行包封处理,并将其添加至豆腐制品中进行评估,结果发现豆腐中的金黄色葡萄球菌数量下降幅度达99.87%,这一结果证实纳米脂质体包封技术不仅显著增强了丁香油的抗菌效能,同时通过抑制微生物增殖有效延长了豆腐产品的保质期限。此外,Marsanasco等^[55]开发了一种负载维生素C与生育酚的多层包埋体系,并将其应用于橙汁产品的功能强化。结果表明,即使在80℃巴氏灭菌处理条件下,该多层包埋系统仍能维持良好的热稳定性,更值得注意的是体系中的维生素C在包埋下被保护。证明该技术能通过分子间相互作用形成保护屏障,有效减缓维生素C的热降解进程。总之,纳米脂质体为保护敏感物质、延缓食物腐败等提供了一种有效的技术手段,但其在食品保鲜中的应用仍面临许多挑战,纳米脂质体稳定性、是否会与食品成分相互作用及其安全性。

3 纳米酶

天然酶在食品保鲜领域的应用受限于多重固有缺陷,包括制备工艺繁琐、产业化成本偏高以及催化效能不稳定等问题。在此背景下,纳米酶作为人工酶工程领域的重要突破,凭借其可调控的类酶活性、优异的物理化学稳定性以及工业化生产可行性,正成为食品保鲜技术创新的核心驱动力。这类纳米级仿生催化剂通过模拟天然酶的活性位点与催化机制,在维持氧化还原反应效能的同时,显著提升了环境耐受性和功能持久性。将纳米酶整合到生物基包装材料中,可有效改善传统保鲜膜在机械强度、气体阻隔性及热稳定性等方面的不足,更赋予其智能化抗菌特性^[56-57]。当前,纳米酶基智能保鲜系统已从单一抗菌功能向多维保鲜机制演进:通过构建气体调控微环境抑制果蔬呼吸代谢,协同催化抗氧化反应延缓脂质氧化,同时利用湿度响应特性维持产品水分平衡。在食品安全监控领域,纳米酶技术已突破传统检测方法的局限,成功开发出集致病菌快速识别与动态保鲜于一体的多功能传感材料。例如,Qu等^[58]开发的铜掺杂二维氮化碳纳米酶创新性地融合光催化产过氧化氢与显色底物催化氧化功能,其构建的仿生级联催化体系不仅能可视化监测微生物污染,还可通过产生活性氧有效抑制腐败希瓦氏菌等食源性致病菌的增殖。值得注意的是,纳

米酶在食品接触材料中的迁移转化行为及其长期暴露风险正引发学术界关注,特别是其剂量依赖的细胞毒性效应与生物累积特性对食品安全构成的潜在威胁。解决这一矛盾需建立基于构效关系的精准剂量模型,并通过多尺度毒性评估体系揭示“抗菌效能—生物安全”的平衡机制,这对推动纳米酶技术从实验室研究向产业化应用转化具有决定性意义。

在食品包装领域的技术革新中,纳米材料持续引领创新进程。相较于常规包装基材,无论是化学合成的纳米材料还是生物纳米复合材料都展现出显著的性能优势(如表2):其独特的微观结构不仅赋予产品卓越的抗菌特性、机械强度和气密屏障功能。但需注意,不同材料体系存在显著缺陷——金属基纳米材料可能引发重金属迁移风险,碳基纳米材料面临规模化生产成本高的问题,而生物基复合材料常受限于湿度敏感性和降解可控性不足等挑战。

值得关注的是,纳米材料可集成智能化监测功能,通过嵌入式传感系统实时追踪温度波动、水分迁移及生物降解等关键食品品质指标。然而,这类智能系统仍需突破多重技术瓶颈:贵金属传感单元存在生物毒性争议,光响应材料易受环境光干扰,而部分金属有机框架纳米载体的长期结构稳定性尚未充分验证。尽管存在这些局限,这种多维度功能集成特性,使其成为推动食品包装向智能化和功能化方向发展的革新性解决方案。

4 结论与展望

在食品包装学科的发展历程中,纳米材料因其独特的理化特性持续占据技术主导地位。与传统包装基材相比,以金属纳米颗粒(如Ag)、碳基纳米材料(如石墨烯、碳纳米管)及生物源纳米复合材料为代表的先进材料体系,展现出显著的性能突破。其优势主要体现在以下维度:① 功能性强化。纳米级粗糙表面与高比表面积赋予材料广谱抗菌活性,有序晶体结构显著提升机械强度,致密堆叠特性赋予优异的气体/水蒸气阻隔性能。② 结构轻量化。纳米材料可实现超薄成膜,在维持机械性能的同时减少原料消耗。③ 智能化集成。通过引入纳米传感单元,可构建实时监测温度、湿度及挥发性腐败标志物的智能响应型包装系统。然而,具有环境友好特性的纳米包装材料在产业化进程中仍面临双重挑战:① 安全性争议与毒理机制不明确,纳米颗粒的界面迁移行为构成关键风险源。长期暴露下可能穿透肠上皮细胞屏障,富集于肝、肾等代谢器官。因此当前亟需构建多尺度迁移预测模型(结合Fick第二定律与分子动力学模拟),并通过体外仿生消化系统与活体示踪技术(如同位素标记)完善风险评估体系。② 传统纳米材料制备存在显著生态短板,

表2 应用于食品包装与保鲜的纳米材料的总结与对比

Table 2 Summary and comparison of nanomaterials applied in food packaging and preservation

种类	名称	用途	实例	缺陷	参考文献
0 D 纳米材料	银纳米粒子	抗菌性	加入壳聚糖季铵盐基质中制备复合膜用于圣女果保鲜,抑制微生物繁殖,减缓果实质量、硬度以及营养成分含量下降的速率	迁移风险	[17]
	ZnO 纳米粒子	稳定性抗菌性	加入壳聚糖薄膜中显著增强热稳定性、机械强度和抗菌性能	食物中残留未知	[59]
	SiO ₂ 纳米粒子	稳定性抗菌性	将 SiO ₂ 纳米粒子涂覆或掺入聚合物基体中,可增强材料的机械强度和刚性,还能够抑制导致食品变质的细菌和病毒	纳米颗粒团聚效应,融出风险	[8]
	疏量子点	抗氧化抗菌性	添加到明胶/琼脂共混薄膜中,在保持材料色泽与透明度同时提升紫外线阻隔性能,表现出抗氧化活性,对李斯特菌具有杀菌效果,对大肠杆菌显示出抑制作用	食物中残留未知 抗菌谱较窄	[3]
	碳量子点	机械性	碳量子点能均匀地分散在天然生物聚合物薄膜中,增强其与包装材料界面吸附力,提高机械性能	光降解风险	[19]
1 D 纳米材料	碳纳米管	抗菌性	碳纳米管和异硫氰酸烯丙酯掺入纤维素基薄膜中制作包装鸡肉的薄膜,降低了微生物污染	是否对鸡肉以外的食物适用	[23]
	银纳米线	传感器	在丝素纤维基上负载聚苯胺/银纳米线作为气体传感器,可用于检测猪肉的新鲜度	金属迁移	[24-25]
2 D 纳米材料	纳米黏土	阻隔性	纳米黏土与生物提取物结合,制备出具有高效阻隔性能、抗氧化和抗菌活性的纳米复合膜。同时,纳米黏土还能够显著改善薄膜的机械性能、阻隔性能和热性能	抗菌谱未知	[26]
	氮化碳	抗菌性	壳聚糖/石墨氮化碳生物纳米复合薄膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌展现出高效抗菌活性	光降解风险	[28]
3 D 纳米材料	金属有机框架	传感器	有氨敏和抗菌功能的钴基金属有机骨架分散于海藻酸钠薄膜中,提升了机械性能、热稳定性、紫外线屏蔽和水蒸气阻隔能力,并展现出抗菌活性和氨敏变色特性,可监测腐败过程	工艺复杂	[29]
	共价有机框架	传感器	共价有机框架可用于嵌入活性成分,用于食品智能包装中活性成分的控制和释放	稳定性较差	[31]
多糖基纳米材料	纳米纤维素	机械性	纸板表面涂覆纤维素纳米纤维和聚吡咯,显著提升了纸板的机械性能;聚乳酸耦合纳米纤维素涂层纸板,复合材料的阻隔性能得到显著改善	界面相容性 回收相容性差	[38-39]
	纳米淀粉	降解性	纳米淀粉颗粒与天然淀粉复合制成的淀粉薄膜在制备可生物降解和可食用包装材料方面具有良好性能	加工稳定性差	[44]
蛋白质基纳米材料	玉米醇溶蛋白	阻隔性抗菌性	含石榴皮提取物的玉米醇溶蛋白膜,延长了奶酪的保质期,该膜具有优异的水阻隔性、拉伸强度、柔韧性及抗氧化抗菌活性	提取物迁移问题	[50]
	小麦面筋	机械性降解性	与聚乙烯醇结合制备复合膜,发现面筋的加入提升了聚乙烯醇的降解性和机械性能	结构不均匀 过敏风险	[48]
	壳聚糖/玉米醇溶蛋白	抗菌性	壳聚糖/玉米醇溶蛋白涂层,显著抑制了椰枣中的黑曲霉生长	涂层附着力	[51]
	杏仁胶	抗氧化	杏仁胶和阿拉伯胶复合用于樱桃表面涂层,有效降低乙烯生成延缓成熟	机械脆性	[52]
脂质基纳米材料	包埋丁香油	稳定性	纳米脂质体技术对丁香油进行封装处理,提高了丁香油的稳定性	氧化风险	[54]
	负载维生素C与生育酚	稳定性	可靠的热结构稳定性和对不耐热的维生素C的保护作用	成本较高	[55]
	封装桑葚提取物	稳定性	壳聚糖包覆纳米脂质体系统封装桑葚提取物,与游离花色苷提取物相比,壳聚糖包覆纳米脂质体中花色苷的损失较少	工艺复杂	[60]
纳米酶	铜掺杂二维氮化碳纳米酶	传感器抗菌性	融合光催化产过氧化氢与显色底物催化氧化功能,其构建的仿生级联催化体系不仅能可视化监测微生物污染,还可通过产生活性氧有效抑制腐败希瓦氏菌等食源性致病菌的增殖	鲁棒性较差,活性氧物质的局限性	[58]

化学还原法合成纳米银时既需消耗能源又会产生含硝酸银的废液;气相沉积法制备碳纳米管时,催化剂金属残留可能通过浸出污染土壤生态系统。对此,绿色合成技术展现出革新潜力。此外,开发可降解纳米复合材料可降低碳足迹。值得关注的是,新一代智能包装系统正通过纳米技术实现功能跃迁:如刺激响应型金属有机框架可依据腐败气体浓度梯度释放抗菌剂等。这些突破性进展在延长食品保质期的同时,推动包装系统向闭环循环经济模式转型。未来研究需聚焦于建立纳米材料全生命周期数据库,并通过仿生设计策略(如叶脉状纳米通道结构)实现性能—安全—可持续性的三重优化。

参考文献

- [1] PIPER J D, PIPER P W. Benzoate and sorbate salts: a systematic review of the potential hazards of these invaluable preservatives and the expanding spectrum of clinical uses for sodium benzoate[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2017, 16(5): 868-880.
- [2] NIE X B, ZHANG R C, CHENG L L, et al. Mechanisms underlying the deterioration of fish quality after harvest and methods of preservation[J]. *Food Control*, 2022, 135: 108805.
- [3] SHAIKH S, YAQOUB M, AGGARWAL P. An overview of biodegradable packaging in food industry[J]. *Current Research in Food Science*, 2021, 4(12): 503-520.
- [4] 江天宇, 王晓娟. 可生物降解纳米材料在食品包装中的研究进展[J]. *化工新型材料*, 2024, 52(S1): 137-142.
JIANG T Y, WANG X J. Research progress of biodegradable nanomaterials in food packaging[J]. *New Chemical Materials*, 2024, 52(S1): 137-142.
- [5] BUMBUDSANPHAROKE N, KO S. Nano-food packaging: an overview of market, migration research, and safety regulations [J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(5): R910-R923.
- [6] PENG B, QIN J C, LI Y J, et al. Recent advances in nanomaterials-enabled active food packaging: nanomaterials synthesis, applications and future prospects[J]. *Food Control*, 2024, 163: 110542.
- [7] INDUMATHI M P, SARAL SAROJINI K, RAJARAJESWARI G R. Antimicrobial and biodegradable chitosan/cellulose acetate phthalate/ZnO nano composite films with optimal oxygen permeability and hydrophobicity for extending the shelf life of black grape fruits[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 132: 1 112-1 120.
- [8] PATNAIK R, PANDA S K, BISWAS S, et al. Prospects and challenges of nanomaterials in sustainable food preservation and packaging: a review[J]. *Discover Nano*, 2024, 19(1): 178.
- [9] 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.
- [10] WANG L, LIN L Z, PANG J. A novel glucomannan incorporated functionalized carbon nanotube films: synthesis, characterization and antimicrobial activity[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 245: 116619.
- [11] SCARFATO P, DI MAIO L, MILANA M R, et al. Performance properties, lactic acid specific migration and swelling by simulant of biodegradable poly(lactic acid)/nanoclay multilayer films for food packaging[J]. *Food Additives and Contaminants Part a-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 2017, 34(10): 1 730-1 742.
- [12] LIN X Q, LI N, XIAO Q, et al. Polyvinyl alcohol/starch-based film incorporated with grape skin anthocyanins and metal-organic framework crystals for colorimetric monitoring of pork freshness[J]. *Food Chemistry*, 2022, 395: 133613.
- [13] PRIYADARSHI R, RIAHI Z, RHIM J W, et al. Sulfur quantum dots as fillers in gelatin/agar-based functional food packaging films[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2021, 4(12): 14 292-14 302.
- [14] TIAN B R, XU D, CHENG J H, et al. Chitosan-silica with hops β -acids added films as prospective food packaging materials: preparation, characterization, and properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 272: 118457.
- [15] ISTIQOLA A, SYAFIYUDDIN A. A review of silver nanoparticles in food packaging technologies: regulation, methods, properties, migration, and future challenges[J]. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 2020, 67(11): 1 942-1 956.
- [16] MIKHAILOVA E O. Silver nanoparticles: mechanism of action and probable bio-application[J]. *Journal of Functional Biomaterials*, 2020, 11(4): 84-109.
- [17] 杨颖, 朱增科, 郭秀兰, 等. 含纳米银粒子的壳聚糖季铵盐复合膜在圣女果保鲜中的应用[J]. *包装工程*, 2024, 45(23): 54-63.
YANG Y, ZHU Z K, GUO X L, et al. Application of chitosan quaternary ammonium composite membrane containing silver nanoparticles in the preservation of cherry tomatoes[J]. *Packaging Engineering*, 2024, 45(23): 54-63.
- [18] ESPITIA P J P, DE FÁTIMA FERREIRA SOARES N, DOS REIS COIMBRA J S, et al. Zinc oxide nanoparticles: synthesis, antimicrobial activity and food packaging applications[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(5): 1 447-1 464.
- [19] 杜雪蓉, 罗玉龙, 董玉珊, 等. 食品源碳点在肉品保鲜中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2025, 46(13): 421-430.
DU X R, LUO Y L, DONG Y S, et al. Research progress on the application of food source carbon dots in meat preservation [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2025, 46(13): 421-430.
- [20] 牛开心, 姚飞, 陈复生. 食源性碳点在食品保鲜中的应用研

- 究进展[J/OL]. 食品与发酵工业. (2024-12-03) [2025-06-28]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.040826>.
- NIU K X, YAO F, CHEN F S. Research progress on the application of foodborne carbon points in food preservation [J/OL]. Food and Fermentation Industries. (2024-12-03) [2025-06-28]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.040826>.
- [21] SARFRAZ J, GULIN-SARFRAZ T, NILSEN-NYGAARD J, et al. Nanocomposites for food packaging applications: an overview[J]. Nanomaterials, 2020, 11(1): 10-26.
- [22] RAUL P K, THAKURIA A, DAS B, et al. Carbon nanostructures as antibacterials and active food-packaging materials: a review[J]. ACS omega, 2022, 7(14): 11 555-11 559.
- [23] DIAS M V, SOARES N D F, BORGES S V, et al. Use of allyl isothiocyanate and carbon nanotubes in an antimicrobial film to package shredded, cooked chicken meat[J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 3 160-3 166.
- [24] LI Y H, LI Y X, SHI J Y, et al. A novel gas sensor for detecting pork freshness based on PANI/AgNWs/silk[J]. Foods, 2022, 11 (15): 2 372-2 382.
- [25] ZAPPA D. Low-power detection of food preservatives by a novel nanowire-based sensor array[J]. Foods, 2019, 8(6): 226.
- [26] PERERA K Y, HOPKINS M, JAISWAL A K, et al. Nanoclays-containing bio-based packaging materials: properties, applications, safety, and regulatory issues[J]. Journal of Nanostructure in Chemistry, 2024, 14(1): 71-93.
- [27] NATH D, SANTHOSH R, PAL K, SARKAR P, et al. Nanoclay-based active food packaging systems: a review[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 31: 100803.
- [28] NI Y S, SHI S, LI M, et al. Visible light responsive, self-activated bionanocomposite films with sustained antimicrobial activity for food packaging[J]. Food Chemistry, 2021, 362: 130201.
- [29] FENG S X, TANG Q, XU Z S, et al. Development of novel Co-MOF loaded sodium alginate based packaging films with antimicrobial and ammonia-sensitive functions for shrimp freshness monitoring[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108193.
- [30] HAASE F, LOTSCH B V. Solving the COF trilemma: towards crystalline, stable and functional covalent organic frameworks [J]. Chemical Society Reviews, 2020, 49(23): 8 469-8 500.
- [31] SHEN C Y, MA Y T, WU D, et al. Preparation of covalent organic framework-based nanofibrous films with temperature-responsive release of thymol for active food packaging[J]. Food Chemistry, 2023, 410: 135460.
- [32] PERERA K Y, JAISWAL S, JAISWAL A K. A review on nanomaterials and nanohybrids based bio-nanocomposites for food packaging[J]. Food Chemistry, 2022, 376: 131912.
- [33] BIKIARIS D N. Nanocomposites with different types of nanofillers and advanced properties for several applications[J]. Applied Nano, 2022, 3(3): 160-162.
- [34] BONDU C, YEN F T. Nanoliposomes, from food industry to nutraceuticals: interests and uses[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 81: 103140.
- [35] WANG Q, XIANG X F, CHEN B C. Food protein-based nanotechnology: from delivery to sensing systems[J]. Current Opinion in Food Science, 2024, 56: 101134.
- [36] 于晓慧, 庞一帆, 王梦阳, 等. 壳聚糖—海藻纳米纤维素协同强化海藻酸钠薄膜的制备及其在南美白对虾冷藏保鲜中的应用[J/OL]. 食品工业科技. (2024-11-05) [2025-06-28]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060440>.
- YU X H, PANG Y F, WANG M Y, et al. Development of chitosan-seaweed nanocellulose enhanced alginate packaging film for the refrigerated preservation of the *Litopenaeus vannamei*[J/OL]. Science and Technology of Food Industry. (2024-11-05) [2025-06-28]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060440>.
- [37] AHANKARI S S, SUBHEDAR A R, BHADAURIA S S, et al. Nanocellulose in food packaging: a review[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 255: 117479.
- [38] BIDEAU B, LORANGER E, DANEAL C. Nanocellulose-polyppyrrole-coated paperboard for food packaging application [J]. Progress in Organic Coatings, 2018, 123: 128-133.
- [39] KOPPOLU R, LAHTI J, ABITBOL T, et al. Continuous processing of nanocellulose and polylactic acid into multilayer barrier coatings[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(12): 11 920-11 927.
- [40] RODRIGUEZ-GARCIA M E, HERNANDEZ-LANDAVERDE M A, DELGADO J M, et al. Crystalline structures of the main components of starch[J]. Current Opinion in Food Science, 2021, 37: 107-111.
- [41] DOME K, PODGORBUNSKIKH E, BYCHKOV A, et al. Changes in the crystallinity degree of starch having different types of crystal structure after mechanical pretreatment[J]. Polymers, 2020, 12(3): 641.
- [42] HE W, WEI C X. Progress in C-type starches from different plant sources[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 73: 162-175.
- [43] BAJER D. Nano-starch for food applications obtained by hydrolysis and ultrasonication methods[J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134489.
- [44] PODGORBUNSKIKH E, SAPOZHNIKOV A, KUSKOV T, et al. Comprehensive enzymatic conversion of starch for the food industry[J]. Polymers, 2022, 14(21): 4 575.
- [45] ONYEAKA H, OBIKEKE K, MAKAKA G, et al. Current research and applications of starch-based biodegradable films for food packaging[J]. Polymers, 2022, 14(6): 1 126.
- [46] JAFARZADEH S, FOROUGH M, AMJADI S, et al. Plant protein-based nanocomposite films: a review on the used nanomaterials, characteristics, and food packaging applications [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63

- (29): 9 667-9 693.
- [47] HADIDI M, JAFARZADEH S, IBARZ A. Modified mung bean protein: optimization of microwave-assisted phosphorylation and its functional and structural characterizations[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 151: 112119.
- [48] DEEPIKA K, PRAVEENA P L, SRISUGAMATHI G, et al. Development and evaluation study of polyvinyl alcohol with gluten film[J]. Materials Today-Proceedings, 2021, 45: 597-602.
- [49] KUMAR M, TOMAR M, PUNIA S, et al. Plant-based proteins and their multifaceted industrial applications[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112620.
- [50] MUSHTAQ M, GANI A, GANI A, et al. Use of pomegranate peel extract incorporated zein film with improved properties for prolonged shelf life of fresh Himalayan cheese (Kalari/kradi) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 48: 25-32.
- [51] SALAJEGHEH F, TAJEDDIN B, PANAH B, et al. Effect of edible coatings based on zein and chitosan and the use of Roman aniseed oil on the microbial activity of Mazafati dates [J]. University of Tehran, 2020, 2: 178-184.
- [52] MAHFOUDHI N, HAMD S. Use of almond gum and gum arabic as novel edible coating to delay postharvest ripening and to maintain sweet cherry (*Prunus avium*) quality during storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 1 499-1 508.
- [53] 徐坚琪, 马洁清, 吴晓芳, 等. 纳米脂质体在食品工业中的研究和制备[J]. 安徽科技, 2016, 29(5): 31-32.
- XU J Q, MA J Q, WU X F, et al. Research and preparation of nanoliposomes in the food industry[J]. Anhui Science & Technology, 2016, 29(5): 31-32.
- [54] CUI H Y, ZHAO C T, LIN L. The specific antibacterial activity of liposome-encapsulated *Clove* oil and its application in tofu [J]. Food Control, 2015, 56: 128-134.
- [55] MARSANASCO M, PIOTRKOWSKI B, CALABRÓ V, et al. Bioactive constituents in liposomes incorporated in orange juice as new functional food: thermal stability, rheological and organoleptic properties[J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2015, 52(12): 7 828-7 838.
- [56] 崔方超, 李兰玲, 王当丰, 等. 纳米酶在食品保鲜中的应用 [J]. 中国食品学报, 2024, 24(3): 405-417.
- CUI F C, LI L L, WANG D F, et al. Application of nanoenzymes in food preservation[J]. Chinese Journal of Food Science, 2024, 24(3): 405-417.
- [57] BHATTACHARJEE A S, WU S, LAWSON C E, et al. Whole-community metagenomics in two different anammox configurations: process performance and community structure [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(8): 4 317-4 327.
- [58] QU L L, FANG X J, XIE T H, et al. Nanozyme-catalyzed cascade reactions for high-sensitive glucose sensing and efficient bacterial killing[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2022, 353: 131156.
- [59] PRIYADARSHI R, NEGI Y S. Effect of varying filler concentration on zinc oxide nanoparticle embedded chitosan films as potential food packaging material[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2017, 25(4): 1 087-1 098.
- [60] GÜLTEKİN-ÖZGÜVEN M, KARADAG A, DUMAN S, et al. Fortification of dark chocolate with spray dried black mulberry (*Morus nigra*) waste extract encapsulated in chitosan-coated liposomes and bioaccessibility studies[J]. Food Chemistry, 2016, 201: 205-212.