

抗菌涂层纸基材料的抗菌机理、涂层优化与应用

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.3002

郝发义¹ 余文龙¹
许合强²

1. 上海理工大学
出版学院
上海 200093
2. 上海出版印刷高等专科学校
印刷实训中心
上海 200093

摘要: 纸基包装材料由于其多孔结构和易吸湿性容易导致微生物滋生, 抗菌涂层技术则能够显著提升纸基包装材料对内装产品的保护性能。系统分析了抗菌剂的抗菌机理及纸基抗菌涂层应用, 重点介绍了无机、天然和有机抗菌剂的特性与优势。为了进一步优化涂层的性能, 从涂层的释放机制和涂层结构两个方面展开, 详细阐述了固定化技术、微胶囊化技术及多层结构和超疏水性抗菌涂层的优化策略。这些技术的结合, 有效提高了涂层的抗菌效果、持久性和环境适应性。此外, 抗菌纸基包装在食品包装和电子商务包装中的实际应用案例, 展示了其在实际应用中的优越性。未来抗菌涂层纸基材料的研究应注重抗菌可持续性多功能性的结合, 以推动其在包装领域的应用。

关键词: 抗菌涂层; 纸基材料; 抗菌剂; 释放机制; 抗菌包装

中图分类号: TB484; TB485.6

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)03-0010-09

引文格式: 郝发义, 余文龙, 许合强. 抗菌涂层纸基材料的抗菌机理、涂层优化与应用 [J]. 包装学报, 2025, 17(3): 10-18.

包装安全与环保意识不断深入人心, 促进纸基材料在包装领域的应用愈发广泛。2024 年, 全球纸基包装市场的规模已达到 1837.2 亿美元, 并预计到 2032 年将以每年 2.91% 的复合增长率增长, 显示出强劲的市场需求动力^[1]。然而, 纸张因其多孔结构和易吸湿等特性, 容易滋生细菌、霉菌等微生物, 致使内装物污染和包装性能降低, 特别是在食品包装和电子商务供应链领域, 这种问题可能引发食品变质、异味甚至食源性疾病。此外, 抗菌性能不足的包装材料还会加剧病原微生物的传播风险, 严重威胁人体健康。

为解决纸基材料的微生物污染问题, 抗菌涂层技术成为提升纸基材料功能性的重要手段。通过在材料表面均匀分布抗菌剂, 抗菌涂层能够形成持续的抗菌屏障, 有效抑制或杀灭微生物, 从而显著改善纸基材料的抗菌性能^[2]。近年来, 随着抗菌剂种类的日益多样化和对其抗菌机理研究的深入, 抗菌剂在涂层中

的应用逐渐成熟。然而, 仅依赖抗菌剂本身的作用难以满足实际应用中复杂多样的需求, 特别是在纸基材料需要兼顾高效性、环保性和适配性的背景下, 优化抗菌涂层的设计成为提升其性能的关键。抗菌剂在涂层中的释放机制直接影响抗菌效果。对于纸基材料而言, 通常采用被动释放型涂层, 其操作简便, 成本低廉, 抗菌剂会随着时间持续释放, 但是这种释放机制的释放速率难以调控且早期快速释放会导致后期抗菌效果减弱^[3]。因此, 研究者提出了诸如固定化技术和微胶囊技术的优化策略, 以提升抗菌涂层的抗菌性能和延长使用寿命。此外, 优化涂层结构是提升纸基抗菌涂层综合性能的重要途径, 通过多层结构和超疏水性的结构优化, 可以显著增强涂层的抗菌性能, 并延长其功能持久性, 同时提高涂层的耐用性和稳定性, 以更好地满足实际应用需求。

本研究从抗菌剂的抗菌机理及涂层应用、抗菌涂

收稿日期: 2025-01-03

基金项目: 上海晨光计划项目 (24CGB08)

作者简介: 郝发义, 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为绿色包装材料、冷链包装, E-mail: haofayi@usst.edu.com

层在纸基材料的优化设计及其在包装领域的实际应用方面进行了综述, 并对未来的发展方向进行展望, 旨在推动抗菌涂层纸基材料的广泛应用, 助力可持续包装产业的发展。

1 抗菌剂的抗菌机理及涂层应用

抗菌剂作为抗菌涂层的核心, 其种类和作用机理在很大程度上决定了涂层的抗菌效果。根据来源和组成的不同, 抗菌剂主要分为无机抗菌剂、有机抗菌剂和天然抗菌剂三大类。

1.1 无机抗菌剂的抗菌机理及涂层应用

无机抗菌剂具有热稳定性高、耐久性强及广谱抗菌性良好等特点, 在实际应用中占据重要地位, 其中, 银 (Ag)、氧化锌 (ZnO) 和二氧化钛 (TiO_2) 因其独特的物理化学特性和高效的抗菌性能而成为最常用的 3 类抗菌剂。

1.1.1 Ag 抗菌剂

Ag 抗菌剂在无机抗菌剂中表现出最为显著的抗菌效果, 广泛应用于食品、医疗、纺织和电子产品等多个行业^[4]。Ag 抗菌剂的抗菌机理主要通过释放银离子实现。银离子的抗菌机理涉及与细菌细胞壁的相互作用、产生活性氧 (reactive oxygen species, ROS) 以及干扰细菌的生理功能等多个方面, 如图 1 所示^[5]。

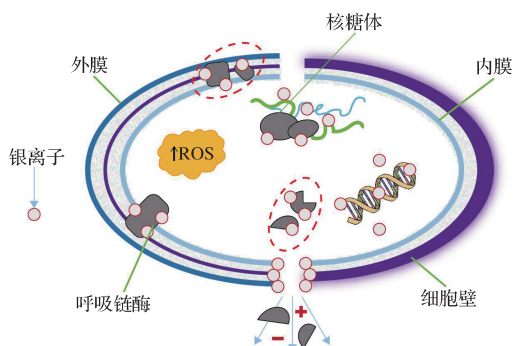


图 1 Ag^+ 对革兰氏阴性 (左) 和革兰氏阳性 (右) 细菌的抗菌机理

Fig. 1 The antibacterial principle of Ag^+ against Gram negative (left) and Gram positive (right) bacteria

首先, 银离子与细菌细胞膜上的负电荷成分, 尤其是磷脂和蛋白质, 发生静电相互作用, 破坏细胞膜的完整性, 致使细胞内容物发生泄漏, 最终导致细菌的细胞结构和功能受到破坏。其次, 银离子在细菌细胞内产生 ROS, 增加氧化应激水平, 进而引发蛋白质损伤、DNA 断裂等, 最终导致细菌死亡。

再次, 银离子还能干扰细菌细胞内关键结构分子的活性, 特别是蛋白质和核酸, 致使细菌的代谢过程被抑制, 能量合成受阻。此外, 银离子还能与 DNA 结合, 抑制 DNA 的复制和转录, 从而抑制细菌的增殖和生长^[5]。

由于银离子具有优异的抗菌性能, 研究者逐步探索其多功能化的应用, 尤其是与其他材料的复合应用。K.Wanitpinyo 等^[6]将银离子引入沸石的微孔中制备银交换沸石 (AgZ), 再将其手工研磨至 1~10 μm 并与淀粉溶液混合涂布在纸张上。研究表明, 沸石具有较好的热稳定性和力学性能, 能够通过限制空间保护银离子, 防止其在高温下还原, 保持银离子抗菌效果的稳定性。

1.1.2 ZnO 抗菌剂

ZnO 因其良好的安全性和多功能性, 尤其在食品领域备受关注。美国食品和药物管理局已将 ZnO 列为公认的安全物质^[7]。ZnO 的抗菌机理主要依赖于光催化反应生成的 ROS 破坏细菌细胞的结构和功能, 以及锌离子的溶出与细菌细胞成分的相互作用, 干扰细菌的代谢和生理过程^[8]。ZnO 纳米颗粒 (nanoparticles, NPs) 在涂层中的应用展现了其在紫外线防护方面的优势。例如, Xie H. H. 等^[9]开发了一种基于 ZnONPs、木质素和单宁的复合涂层, 并将其应用于纸张, 经过 72 h 紫外老化测试发现, 纸张的力学性能和抗紫外性能几乎未发生下降。

1.1.3 TiO_2 抗菌剂

TiO_2 的抗菌性能主要依赖其光催化活性。通过紫外线或太阳光照射, TiO_2 表面会产生 ROS, 包括超氧阴离子、羟自由基和过氧化氢, 这些 ROS 会对细菌的细胞膜和 DNA 造成破坏 (抑菌机理如图 2 所示^[10]), 从而有效抑制细菌生长。

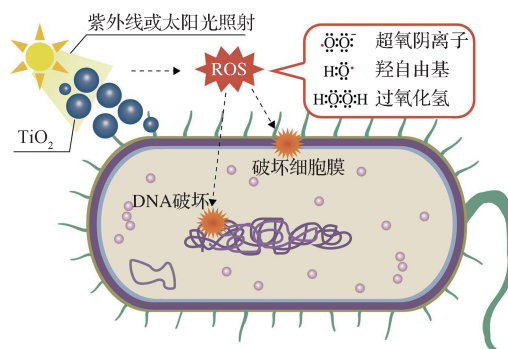


图 2 TiO_2 光催化抗菌原理

Fig. 2 Principle of TiO_2 photocatalytic antibacterial activity

然而, 由于 TiO_2 的抗菌作用高度依赖光照, 在低光或无光条件下, TiO_2 的抗菌效率显著下降。为克服这一不足, 研究者通过掺杂或修饰的方法改进 TiO_2 的光催化性能^[11]。此外, TiO_2 具有出色的白度和不透明度。A. Ozcan 等^[12]通过巯基点击反应将修饰后的壳聚糖与 TiO_2NPs 连接, 所制备的抗菌涂层不仅具有优异的抗菌性能, 还显著提升了纸的光泽度和印刷适性, 其颜色变化符合 ISO 12647 系列标准的要求。

1.2 天然抗菌剂的抗菌机理及涂层应用

天然抗菌剂主要来源于生物资源, 具有低毒性和生物相容性。这些天然抗菌剂通常从动植物中提取, 图 3 展示了部分天然抗菌剂的来源。天然抗菌剂与抗氧化剂的协同作用应用于食品包装能实现对食品的双重保护, 活性抗菌物质能有效抑制微生物生长, 抗氧化剂能够有效清除自由基, 延缓食品的氧化和品质劣化。如 Dong H. 等^[13]开发了一种基于普鲁兰的抗菌涂布纸, 通过添加茶多酚和维生素 C, 使涂布纸不仅表现出抑菌效果, 还显著增强了抗氧化性能, 与未经涂布的原纸相比, 该涂布纸的自由基清除率高达 87%。



图 3 来自天然的抗菌剂

Fig. 3 Natural antibacterial agents

1.2.1 壳聚糖

壳聚糖 (chitosan, CS) 是从甲壳动物外壳中提取的多糖。CS 通过其带正电荷的氨基与细菌细胞膜中带负电荷的磷脂发生静电相互作用, 破坏细胞膜结构, 从而抑制细菌生长。同时, CS 还能与细菌的 DNA 结合, 阻止 DNA 复制, 从多个层面实现广谱抗菌效果^[14]。然而, CS 的抗菌活性易受环境 pH 和温度的影响。研究者通过化学修饰提升 CS 的抗菌性能, 使其更适用于复杂的包装环境。如 Ruan X. M.

等^[15]通过将季磷盐和水杨酸接枝到壳聚糖上, 修饰后 CS 的结晶度降低, 水溶性增强, 并且 CS/季磷盐/水杨酸复合抗菌材料不仅对常见的大肠杆菌 (*E. coli*) 和金黄色葡萄球菌 (*S. aureus*) 的抗菌活性显著提高, 季磷盐和水杨酸的协同作用还显著改善了对炭疽杆菌的抗菌效果。

1.2.2 精油

精油是一类从植物中提取的天然芳香挥发性液体, 可溶于油脂、酒精、醚或氯仿等溶剂中。精油的化学成分复杂, 其中包括萜烯类、萜类氧化物(醇、醛、酮、酯)、芳香族化合物和脂肪族化合物、含氮和含硫化合物。尽管不同精油的化学组成有所差异, 但其主要活性成分只有两三种, 占总质量的 20%~70%。例如, 肉桂精油中的主要活性成分是肉桂醛 (47.10%) 和反式茴香脑 (13.39%)^[16]。精油的抗菌机制复杂且多样, 其主要作用包括破坏细菌的细胞壁和细胞膜结构, 改变膜的通透性和电位, 从而导致细胞内容物的泄漏。此外, 精油成分还能破坏膜的脂质双层和膜蛋白功能, 进而抑制细菌的酶活性和蛋白质代谢, 损害线粒体并干扰其膜电位, 导致 DNA 损伤。精油还能够通过干扰细菌的信号分子传导, 抑制细菌的群体感应机制和生物膜的形成^[17]。

近年来, 研究者对精油的来源进行了更广泛的探索, 特别是农业废弃物的再利用, 其展现出显著的潜力。Wu P. P. 等^[18]从废弃的香水柠檬果实和叶子中提取了精油, 这些精油不仅在抑制细菌方面表现出良好活性, 还展现了对亚洲虎蚊及成蚊的驱虫效果, 这种驱蚊特性有助于减少蚊子传播疟疾、登革热等疾病造成的公共卫生危害。此外, N. U. Visakh 等^[19]通过水蒸气蒸馏法从柚子果皮废弃物成功提取具有生物活性的精油, 精油提取率较高 (每 100 g 柚子皮可提取约 0.58 mL 精油), 该研究显示了果皮废弃物的潜在经济价值。

1.3 有机抗菌剂的抗菌机理及涂层应用

有机抗菌剂通常为人工合成化合物, 包括季铵盐、苯酚类化合物和有机胺等^[20]。有机抗菌剂适用于在短期内需要高效抗菌的场景中, 其抗菌机制主要通过与细菌细胞膜相互作用, 改变膜的通透性, 导致细胞内容物泄漏, 进而抑制细菌代谢或直接导致细胞死亡。相比于天然抗菌剂长期自然选择而形成的复杂抗菌机制, 有机抗菌剂由于作用机制单一且开发使用迅速, 容易引发细菌的耐药性^[21]。此外, 有机抗菌

剂在使用过程中也可能存在毒性高、环境不友好等问题，这些因素限制了其在抗菌涂层中的应用。

表 1 汇总了不同抗菌剂在抗菌涂层应用中的目标微生物、测试方法和抗菌效果的研究数据。这些抗菌剂涵盖了无机抗菌剂、天然抗菌剂及有机抗菌剂，展示了它们在对抗不同微生物方面的活性表现。NPs 形式的抗菌剂在涂层中的应用十分广泛，主要得益于其相较于原尺寸有着更优异分散性、更高的表

面积，以及更强的抗菌活性。近年来，NPs 形式抗菌剂的生物合成方法备受关注。研究者利用植物提取物^[22-26]、细菌素^[27]、淀粉^[28, 29]等天然生物分子作为还原剂和稳定剂，通过绿色、可持续的方法制备 NPs。这种方法不仅降低了化学制备过程中使用有毒试剂的风险，还提高了抗菌剂的生态友好性，进一步拓展了其在纸基材料涂层中的实际应用潜力。

表 1 不同抗菌剂的目标微生物及抗菌效果

Table 1 Target microorganisms and antibacterial efficacy of different antibacterial agents				
抗菌剂	评估目标微生物	测试方法	抗 菌 效 果	参考文献
AgZ	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>	琼脂扩散法	涂层纸对 <i>S. aureus</i> 的抑菌圈直径在 11.67~14.00 mm 之间，对 <i>E. coli</i> 的抑菌圈直径为 10.00 mm	[6]
香水柠檬精油	<i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> 和沙门氏菌	琼脂扩散法	对 <i>S. aureus</i> 抑菌圈直径范围为 (7.27 ± 0.06)~(10.37 ± 0.15) mm，对 <i>E. coli</i> 和沙门氏菌没有抑制活性	[18]
聚己二胍	<i>E. Coli</i> 、李斯特菌	琼脂扩散法	抑菌圈直径分别为 (19.4 ± 0.3), (21.5 ± 0.4) mm	[20]
艾叶精油	<i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> 、白色念珠菌	微量稀释法	IC50 值分别为 (25.51 ± 2.29), (49.53 ± 0.86), (214.98 ± 3.27) μg/mL	[22]
CSNPs	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>	微量稀释法	在 500 mg/cm ³ 的质量浓度下，分别抑制了两种细菌 95% 和 98% 的活性	[23]
ZnONPs	奇异变形杆菌、铜绿假单胞菌、蜡样芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌和鼠伤寒沙门氏菌	琼脂扩散法	在 10 mg/L 的质量浓度下，对微生物的抑菌效果均超过了庆大霉素对照组，抑菌圈直径为 (12.30 ± 0.13)~(14.70 ± 0.16) mm	[24]
TiO ₂ NPs	尼日尔曲霉、白念珠菌和黄曲霉	孔扩散法	在 100 μg/mL 的质量浓度下，对 3 种真菌的抑菌圈直径分别为 (29.85 ± 0.90), (30.23 ± 1.08), (30.02 ± 0.75) mm	[25]
TiO ₂ NPs	<i>E. coli</i>	琼脂孔扩散法	在 150 μg/mL 的质量浓度下，对细菌的抑菌圈直径为 (13.00 ± 0.39) mm；500 μg/mL 下对应的抑菌圈直径为 (26.50 ± 0.79) mm	[26]
AgNPs	蜡状芽孢杆菌、 <i>S. aureus</i>	孔扩散法	用细菌素作为生物制剂合成的 AgNPs 对两种细菌的抑菌圈直径分别为 27, 18 mm	[27]
AgNPs	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> 和扩展青霉	纸片扩散法	抗菌剂加入淀粉溶液制备的涂布纸对细菌的抑菌圈直径在 1.5~2.2 mm 之间，同时对扩展青霉也具有一定抑制效果	[28]
G-AgNPs	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>	纸片扩散法	30% 的 G-AgNPs 涂层纸对两种细菌的抑菌圈直径分别为 0.207, 0.158 cm	[29]

2 纸基抗菌涂层的优化

选择合适的抗菌剂是实现优异抗菌效果的基础，但仅依赖抗菌剂本身的功能，往往难以应对实际应用中的多样化需求和挑战。随着包装行业对抗菌涂层功能性需求的不断提升，对抗菌涂层进行优化已成为增强其应用价值的重要途径。

2.1 纸基抗菌涂层的释放机制及优化

2.1.1 固定化技术

固定化技术通过将抗菌剂以物理吸附、化学键合等方式固定在涂层中，从而有效延长抗菌剂的作用时间，避免其在应用过程中出现快速释放或迁移的问题^[30]。这种方法能实现更均匀和可控地释放抗菌剂，

不仅能提高抗菌效果的稳定性，还能减少抗菌剂的浪费，尤其在食品包装领域，严格控制抗菌剂的释放量至关重要。He Y. Q. 等^[31]采用纤维素纳米晶体（cellulose nanocrystals, CNC）作为模板和稳定剂，将合成的 AgNPs 固定于纸张表面。由于 CNC 具有较高的比表面积和丰富的羟基，因而通过离子-偶极相互作用来固定 AgNPs，能确保 AgNPs 在涂层中的均匀分散，有效防止 AgNPs 的聚集和早期释放。此外，研究者还对涂层纸张在不同 pH 条件下 AgNPs 的累积释放率进行了测试。结果显示，在乙醇和异辛烷中银迁移量分别为 19.7, 5.72 μg/kg，均低于欧洲食品安全局设定的银迁移限值 50 μg/kg。这表明，该方法能够有效控制抗菌剂的释放量，符合食品包装领域的安全

标准。

2.1.2 微胶囊技术

微胶囊技术的基本原理是将抗菌剂包裹在具有屏障功能的胶囊壳中,形成核心-壳层结构。核心通常为液态或固态的抗菌剂,而壳层由合成或天然聚合物构成,起到保护核心物质并调控其释放的作用。胶囊壳层通常具有半透性,允许核心物质通过扩散和渗透逐渐释放到外部环境中^[32]。含有微胶囊的涂料在纸张涂层中的应用如图 4 所示^[32]。

微胶囊技术能够有效减缓精油的挥发性和不稳定性,并减少其对食品的潜在影响,为此纳米载体包裹和微胶囊化技术被广泛采用。Zhu L. 等^[33]使用羟丙基- β -环糊精(HP- β -CD)作为壳层,将茶树精油作为核心,通过饱和水溶液法制备了茶树精油微胶囊。HP- β -CD 的优异包含能力和热稳定性使得茶树精油在高温环境下得到有效保护。将这种微胶囊与普鲁兰涂布在牛皮纸上时,在高达 288 °C 的温度下仍无热分解现象,显著改善了精油的稳定性和缓释性能。

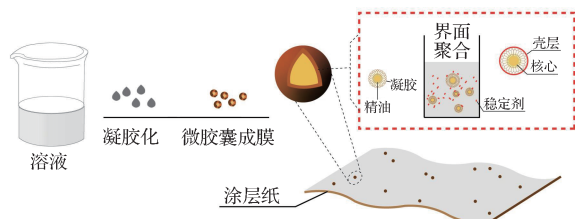


图 4 微胶囊抗菌涂层的制备

Fig. 4 Preparation of microcapsule antibacterial coating

2.2 抗菌涂层结构优化

2.2.1 多层结构的抗菌涂层

多层结构的抗菌涂层是一种通过分层设计,将抗菌性能与其他功能(如阻隔性、力学性能和防水性)有机结合的涂层优化策略。这种结构通过在基底与涂层之间加入多种功能层,或者在涂层内实现分层设计,提高纸张的综合性能。Liu B. Z. 等^[34]开发了一种双涂层结构,其底层采用 CS 和 CNC 涂层,提供基础抗菌性能,并增强材料的力学性能和稳定性;顶层则利用乙基纤维素和绿核桃壳提取物(GWHE)制备的涂层,赋予材料优异的防油防水性能。GWHE 富含多酚和黄酮等活性成分,具备显著的抗氧化和抗菌特性,为涂层提供了额外的抗菌作用。Yi C. F. 等^[35]成功开发了一种环保且具有高阻隔性能的抗菌食品包装材料,通过在纸张上依次涂覆 CS、疏水改性的纤维素纳米纤维和玉米醇溶蛋白 3 层涂层,显著提高

了纸张的油脂和水分阻隔性,并且无需使用任何黏合剂就能实现热封性能,剥离强度达到 372.6 N/m。由于 CS 的天然抗菌特性,这种三涂层纸张对 *S. aureus* 和 *E. coli* 展现出了显著的抗菌效果。

2.2.2 超疏水性抗菌涂层

超疏水性抗菌涂层通过将超疏水表面结构与抗菌功能相结合,构建兼具防水、防污和抗菌性能的多功能涂层。这类涂层以超疏水表面微纳结构为基础,借助其特殊的表面能和接触角效应,有效抑制微生物在表面的附着与繁殖。同时,超疏水涂层还能减少外界湿气、水分或污渍的侵入,间接抑制微生物的生存和繁衍。Jiang X. F. 等^[36]将聚乳酸(PLA)与肉桂醛(CIN)的混合物作为阻隔层,纳米二氧化硅改性硬脂酸(SA/SiO₂)作为超疏水层,成功制备了一种可降解的兼具超疏水和抗菌性能的复合纸包装材料。结果表明,该超疏水抗菌复合纸的接触角达到 156.3°,对 *E. coli* 和 *S. aureus* 的抗菌效率达到了 100%。Yang R. 等^[37]通过在纸张表面原位生长纳米棒以增加纸张表面的粗糙度,并利用纳米棒的孔隙负载香芹酚使其持续释放,赋予了纸张优异的抗菌性能;同时涂覆低表面能的聚二甲基硅氧烷来实现纸张的超疏水性。结果表明,纸张的超疏水性有效减少了细菌黏附,对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的黏附量分别减少了 87.5% 和 88.4%,有效提升抗菌纸的抗菌效果。

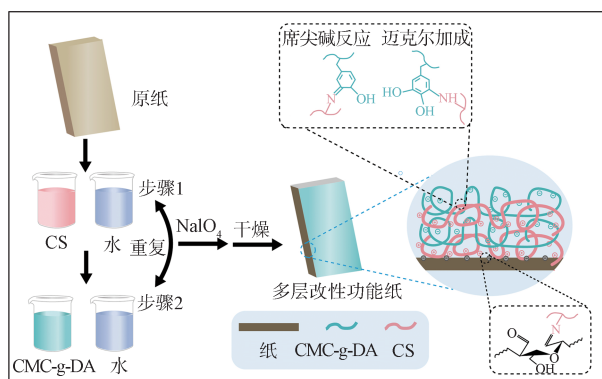
3 抗菌涂层纸基材料的应用

3.1 食品包装

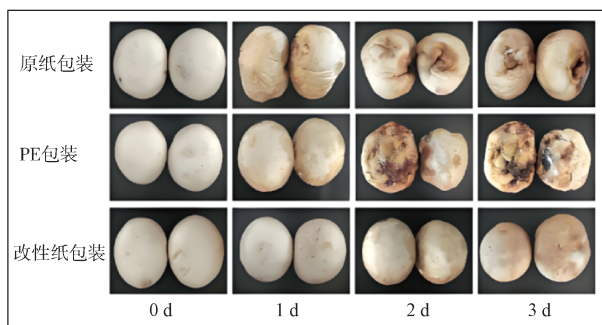
近年来,抗菌涂层纸基材料在食品包装中的应用取得了显著进展,通过结合抗菌性能和其他功能特性,有效延长了食品的货架期并提升了食品安全性。Yu F. Y. 等^[38]通过 CS 与多巴胺接枝羧甲基纤维素(CMC-g-DA)逐层沉积,并利用高碘酸钠氧化交联,构建了具有稳定抗菌涂层的抗菌纸(制备过程见图 5a),并将其应用于双孢蘑菇的保鲜包装。结果表明,抗菌涂层即使在强酸、强碱和盐溶液等极端环境下,仍能保持抗菌性能的稳定性;抗菌纸在延缓色差变化、减少质量损失和保持硬度方面表现显著优于原纸和 PE(保鲜效果见图 5b)。

在水果保鲜方面的应用中,A. M. Adel 等^[39]通过提取甘蔗纤维中的氧化纤维素纳米晶体并与 TiO₂NPs 结合,再将二者与海藻酸钠混合涂覆在纸张上,制成了具有更高阻隔性和抗菌活性的环保食品包

装纸。在草莓保鲜测试中, 这种新型包装纸将草莓的货架期从 6 d 增加到 18 d, 有效维持了草莓的品质。Zhang X. 等^[40]以紫甘蓝花色苷、聚乙烯醇(PVA)和羧甲基纤维素钠为基质, 并以埃洛石纳米管为载体负载百里香精油和 CS, 开发了一种兼具新鲜度指示和抗菌性能的多功能涂层包装纸, 并用于肉类的保鲜。该涂层能够对 pH 值和挥发性氨气进行动态响应, 通过颜色变化监测食品的新鲜度, 同时延长了鱼类冷藏保鲜期 1~2 d。



a) 制备流程



b) 双孢蘑菇在 3 种包装材料中的保鲜效果对比

图 5 抗菌纸的制备流程及其在双孢蘑菇的保鲜应用

Fig. 5 Preparation process of antibacterial paper and its application in the preservation of *Agaricus bisporus*

3.2 电子商务包装

与传统包装材料相比, 抗菌涂层纸基材料在电子商务供应链的应用中有着独特优势。这种抗菌型纸包装能够有效降低运输和储存过程中细菌和病毒的传播风险, 特别是在防止病原微生物传播和保障运输物品卫生安全方面。P. Chauhan 等^[41]利用从印度藏茴香中提取的 Ajowan 精油作为抗菌剂, 并以 PVA 作为黏合剂, 制备了一种水基涂层乳液, 通过喷雾的方式将其涂覆在包装纸上, 赋予纸张抗菌性能, 从而降低电子商务供应链中疾病传播的风险。研究表明, 涂层纸因 PVA 的加入, 其弯曲刚度和撕裂强度显著

提高。此外, 将涂层纸在不同浓度 Ajowan 精油下对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的抗菌活性进行测试, 结果显示涂层纸均具有良好的抗菌效果, 且抗菌作用可持续 10 d。He S. M. 等^[42]通过快速浸渍处理技术, 成功开发出一种具有出色阻燃、抗菌和抗霉性能的纤维素基纸张, 其对 *S. aureus* 的抗菌效率高达 99.99%。对绿色木霉的抗霉性能达到 Grade 1, 意味着真菌覆盖面积小于 10%, 能有效减少包装物在运输过程中的风险。

未来, 随着抗菌技术和包装工艺的进一步优化, 抗菌型纸包装在供应链各环节中的潜力将得到更广泛的挖掘, 为减少疾病传播与环境污染提供更加全面的解决方案。

4 结语

抗菌涂层纸基材料的研究以抗菌剂的种类及抗菌机理为基础, 不仅丰富了抗菌涂层的种类, 也显著提升了纸基包装的抗菌性能。然而, 当前的研究仍面临一些挑战, 例如抗菌剂在涂层中的释放控制、抗菌持久性及环境友好性等问题。未来的研究应更加注重抗菌可持续性或多功能性的结合。例如, 探索新型绿色合成技术与生物基抗菌剂的开发, 利用固定化技术与微胶囊技术, 进一步增强抗菌剂的稳定性和释放控制, 通过设计多层结构涂层, 实现抗菌功能与阻隔性、力学性能的协同优化, 同时推动抗菌涂层纸在食品包装与电子商务等领域的广泛应用。通过多学科交叉合作, 抗菌涂层纸基材料将在推动绿色与高性能包装产业发展中发挥更加重要的作用。

参考文献:

- [1] [佚名]. 纸基包装材料市场规模及 2032 年未来增长 [EB/OL]. [2024-11-10]. <https://www.wiseguyreports.com/cn/reports/paper-based-packaging-materials-market>.
- [2] KİŞLA D, GÖKMEN G G, AKDEMİR EVRENDİLEK G, et al. Recent Developments in Antimicrobial Surface Coatings: Various Deposition Techniques with Nanosized Particles, Their Application and Environmental Concerns[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 135: 144-172.
- [3] BASTARRACHEA L J, WONG D E, ROMAN M J, et al. Active Packaging Coatings[J]. Coatings, 2015, 5: 771-791.
- [4] KAPUSTA O, JAROSZ A, STADNIK K, et al.

- Antimicrobial Natural Hydrogels in Biomedicine: Properties, Applications, and Challenges: A Concise Review[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(3): 2191.
- [5] KĘDZIORA A, SPERUDA M, KRZYŻEWSKA E, et al. Similarities and Differences Between Silver Ions and Silver in Nanoforms as Antibacterial Agents[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(2): 444.
- [6] WANITPINYO K, NANTA K, CHITBANYONG K, et al. Enhancing Antibacterial Characteristics of Paper Through Silver-Exchanged Zeolite Coating for Packaging Paper[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2025, 22(1): 171–179.
- [7] LIAO C Z, JIN Y M, LI Y C, et al. Interactions of Zinc Oxide Nanostructures with Mammalian Cells: Cytotoxicity and Photocatalytic Toxicity[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(17): 6305.
- [8] RAVI P, REDDY M C, CHANDRASEKHAR T, et al. Biogenic Nano Zinc Oxide Particle Production and Their Antimicrobial Potentials: A Review[J]. Journal of Cluster Science, 2024, 36(1): 8.
- [9] XIE H H, ZHANG H, LIU X X, et al. Design and Preparation of Multiple Function-Integrated Lignin/Tannin/ZnONP Composite Coatings for Paper-Based Green Packaging[J]. Biomacromolecules, 2021, 22(8): 3251–3263.
- [10] SEROV D A, GRITSAEVA A V, YANBAEV F M, et al. Review of Antimicrobial Properties of Titanium Dioxide Nanoparticles[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(19): 10519.
- [11] SHANG C Y, BU J Y, SONG C. Preparation, Antimicrobial Properties Under Different Light Sources, Mechanisms and Applications of TiO₂: A Review[J]. Materials, 2022, 15(17): 5820.
- [12] OZCAN A, ARMAN KANDIRMAZ E, ACAR BUYUKPEHLIVAN G. Chitosan-Titanium Nanoparticle Coated Papers for Active Packaging[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 356: 111584.
- [13] DONG H, TIAN Z J. Preparation and Characterization of Pullulan-Based Packaging Paper for Fruit Preservation[J]. Molecules, 2024, 29(6): 1394.
- [14] CHEN Q Z, QI Y, JIANG Y W, et al. Progress in Research of Chitosan Chemical Modification Technologies and Their Applications[J]. Marine Drugs, 2022, 20(8): 536.
- [15] RUAN X M, LI P W, WANG C, et al. Synergistic Antibacterial Activity of Chitosan Modified by Double Antibacterial Agents as Coating Material for Fruits Preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 222: 3100–3107.
- [16] BERIDA T I, ADEKUNLE Y A, DADA-ADEGBOLA H, et al. Plant Antibacterials: The Challenges and Opportunities[J]. Heliyon, 2024, 10(10): e31145.
- [17] WANG J D, ZHAO F Y, HUANG J L, et al. Application of Essential Oils as Slow-Release Antimicrobial Agents in Food Preservation: Preparation Strategies, Release Mechanisms and Application Cases[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(18): 6272–6297.
- [18] WU P P, TANG X W, JIAN R C, et al. Chemical Composition, Antimicrobial and Insecticidal Activities of Essential Oils of Discarded Perfume Lemon and Leaves (*Citrus limon* (L.) Burm. F.) as Possible Sources of Functional Botanical Agents[J]. Frontiers in Chemistry, 2021, 9: 679116.
- [19] VISAKH N U, PATHROSE B, NARAYANANKUTTY A, et al. Utilization of Pomelo (*Citrus maxima*) Peel Waste into Bioactive Essential Oils: Chemical Composition and Insecticidal Properties[J]. Insects, 2022, 13(5): 480.
- [20] 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.
- [21] AICH N, AHMED N, PAUL A. Issues of Antibiotic Resistance in Aquaculture Industry and Its Way Forward[J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2018, 7(8): 26–41.
- [22] LI D Y, WANG R, YOU M, et al. The Antimicrobial Effect and Mechanism of the Artemisia Argyi Essential Oil Against Bacteria and Fungus[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2024, 55(1): 727–735.
- [23] NIGAM S, RAM D V, KUMAR A A M. Synthesis of Chitosan-Based Nanoparticles from Plant Extract of Clitoria Ternatea and Study of Their Antibacterial Activity[J]. International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research, 2022: 154–160.
- [24] ORIE K J, OKOCHA B I. Biosynthesis and Antimicrobial Studies of Zinc Oxide Nanoparticles of Vernonia Amygdalina Leaf with Varying Concentration of Zinc Oxide[J]. Inorganic Chemistry Communications, 2024, 162: 112178.
- [25] ALI H M, DIXIT S, ALARIFI S. Green Synthesis

- of Titanium Dioxide Nanoparticle Using Combination of Plants and Its Antimicrobial Study with Their Characterization[J]. *Materials Research Express*, 2024, 11(9): 095403.
- [26] SAINI R, KUMAR P. Green Synthesis of TiO_2 Nanoparticles Using *Tinospora Cordifolia* Plant Extract & Its Potential Application for Photocatalysis and Antibacterial Activity[J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2023, 156: 111221.
- [27] SHARMA S, SHARMA N, KAUSHAL N. Utilization of Novel Bacteriocin Synthesized Silver Nanoparticles (AgNPs) for Their Application in Antimicrobial Packaging for Preservation of Tomato Fruit[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2023, 7: 1072738.
- [28] JUNG J, KASI G, SEO J. Development of Functional Antimicrobial Papers Using Chitosan/Starch-Silver Nanoparticles[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 112: 530–536.
- [29] TROTTA F, DA SILVA S, MASSIRONI A, et al. Advancing Food Preservation: Sustainable Green- AgNPs Bionanocomposites in Paper-Starch Flexible Packaging for Prolonged Shelf Life[J]. *Polymers*, 2024, 16(7): 941.
- [30] GREEN J D, FULGHUM T, NORDHAUS M A. Review of Immobilized Antimicrobial Agents and Methods for Testing[J]. *Biointerphases*, 2011, 6(4): CL2–43.
- [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] WANG W, ZHANG W W, LI L, et al. Biodegradable Starch-Based Packaging Films Incorporated with Polyurethane-Encapsulated Essential-Oil Microcapsules for Sustained Food Preservation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 235: 123889.
- [33] ZHU L, LIU Y J, LIU J M, et al. Preparation and Characterization of Tea Tree Essential Oil Microcapsule-Coated Packaging Paper with Bacteriostatic Effect[J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 23: 101510.
- [34] LIU B Z, SUN F F, ZHU P Y, et al. Preparation of Multi-Barrier and Multi-Functional Paper-Based Materials by Chitosan, Ethyl Cellulose and Green Walnut Husk Biorefinery Products for Sustainable Food Packaging[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 278: 134557.
- [35] YI C F, YUAN T Z, XIAO H N, et al. Hydrophobic-Modified Cellulose Nanofibrils (CNFS)/Chitosan/Zein Coating for Enhancing Multi-Barrier Properties of Heat-Sealable Food Packaging Materials[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 666: 131245.
- [36] JIANG X F, LI Q, LI X T, et al. Preparation and Characterization of Degradable Cellulose-Based Paper with Superhydrophobic, Antibacterial, and Barrier Properties for Food Packaging[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(19): 11158.
- [37] YANG R, LIU B Z, YU F Y, et al. Superhydrophobic Cellulose Paper with Sustained Antibacterial Activity Prepared by In-Situ Growth of Carvacrol-Loaded Zinc-Based Metal Organic Framework Nanorods for Food Packaging Application[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 234: 123712.
- [38] YU F Y, SHI H B, WANG K, et al. Preparation of Robust and Fully Bio-Based Modified Paper via Mussel-Inspired Layer-by-Layer Assembly of Chitosan and Carboxymethyl Cellulose for Food Packaging[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 222: 1238–1249.
- [39] ADEL A M, AL-SHEMY M T, DIAB M A, et al. Immobilization of $\text{TiO}_2\text{NP}@$ Oxidized Cellulose Nanocrystals for Paper-Based Active Packaging Materials[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 231: 123270.
- [40] ZHANG X, LIU W J, LI C W. A Double-Sided Coating Paper Antibacterial Indicator Card Based on Polyvinyl Alcohol/Sodium Carboxymethyl Cellulose-Anthocyanins and Chitosan-Halloysite Nanotubes Loaded Essential Oil to Monitor Fish Freshness[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 278: 134716.
- [41] CHAUHAN P, AHUJA A, SINGH D, et al. *Trachyspermum Ammi*, a Plant-Based Antimicrobial Agent for Paper Packaging in E-Commerce for Consumer Safety[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2024, 192: 108525.
- [42] HE S M, WANG F, ZHANG L, et al. Quick and Efficient Flame-Retardant, Antibacterial and Antifungal Treatment for High-Performance Cellulose Paper[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2023, 185: 107947.

(责任编辑: 李玉华)

Antibacterial Mechanism, Coating Optimization and Application of Antibacterial Coated Paper-Based Materials

HAO Fayi¹, YU Wenlong¹, XU Heqiang²

(1. Publishing College, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Printing Training Centre, Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

Abstract: Due to its porous structure and hygroscopicity, paper-based packaging materials are prone to microbial growth. The antibacterial coating technology can significantly enhance the protective performance of paper-based materials for interior products. The antibacterial mechanism of antibacterial agents and the application of paper-based packaging antibacterial coatings are systematically analyzed, with the focus on the characteristics and advantages of inorganic, natural and organic antibacterial agents. In order to further optimize the performance of the coating, the optimization strategies of immobilization technology, microencapsulation technology, multi-layer structure, and superhydrophobic antibacterial coating are elaborated from two aspects of the release mechanism of the coating and the coating structure. The combination of these technologies effectively improves the antibacterial effects, durability, and environmental adaptability of the coating. In addition, practical application cases of antibacterial paper-based packaging in food packaging and e-commerce packaging are demonstrated its superiority in practical applications. The future research directions of antibacterial coating paper-based materials should focus on the combination of resistance to persistence and multi-functionality, to promote their application in the packaging field.

Keywords: antibacterial coating; paper-based material; antibacterial agent; release mechanism; antibacterial packaging