

# 降解与抗菌高分子改性材料的研究进展

黄金飞<sup>1</sup>, 陈晨<sup>2</sup>, 何晖晖<sup>1</sup>, 张馨<sup>1</sup>, 李军<sup>2</sup>, 蒋昊君<sup>2</sup>, 刘凯悦<sup>1</sup>

(1. 浙江省质量科学研究院, 浙江 杭州 310018; 2. 上海工程技术大学, 上海 201620)

**摘要:** 文章综述兼具降解与抗菌功能的高分子改性材料的研究进展, 探讨其在环保与健康领域的应用潜力。首先概述常见可降解基材的制备方法、性能特点及应用领域, 主要包括聚乳酸(PLA)和聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)。随后详细介绍天然、有机和无机抗菌剂的分类方式、抗菌机制及其在聚合物材料中的应用实例, 对比分析不同抗菌剂的优缺点, 探讨抗菌改性材料的发展趋势。研究表明, 天然、有机和无机抗菌剂各具优劣, 单一抗菌剂难以满足多元化应用场景的需求。未来研究应着力开发融合三类抗菌剂优势的复合抗菌材料, 以实现协同增效。同时, 还需要从全生命周期角度系统审视抗菌高分子材料的制备工艺、抗菌机理及环境影响, 推动其在食品包装、医药器材等领域的示范应用与产业化进程。

**关键词:** 可降解材料; 高分子; 抗菌改性

中图分类号: TQ317

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0202-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.036

## Research Progress of Degradable and Antibacterial Polymer Modified Materials

HUANG Jinfei<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>2</sup>, HE Huihui<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, LI Jun<sup>2</sup>, JIANG Haojun<sup>2</sup>, LIU Kaiyue<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Institute of Quality Science, Hangzhou 310018, China; 2. Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** The paper summarized the research progress of polymer modified materials with both degradable and antibacterial functions, and explored their application potential in environmental protection and health fields. The preparation methods, performance characteristics and application fields of common degradable substrates were first outlined, mainly including polylactic acid (PLA) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT). Subsequently, the classification methods, antimicrobial mechanisms, and application examples in polymer materials of natural, organic, and inorganic antimicrobial agents were introduced in detail. The advantages and disadvantages of different antibacterial agents were compared and analyzed, and the development trends of antibacterial modification methods were discussed. The results showed that natural, organic and inorganic antibacterial agents each had their own strengths and weaknesses, and single antibacterial agents were difficult to meet the needs of diversified application scenarios. Future research should focus on developing composite antibacterial materials that integrated the advantages of the three types of antibacterial agents to achieve synergistic effects. Meanwhile, it was also necessary to systematically examine the preparation processes, antibacterial mechanisms and environmental impacts of antibacterial polymer materials from a full life cycle perspective, so as to promote their demonstration applications and industrialization in food packaging, medical devices and other fields.

**Keywords:** Biodegradable materials; Macromolecule; Antibacterial modification

随着塑料等高分子材料消费量的持续攀升, 其废弃物在自然环境中快速堆积, 对生态环境造成严重破坏, 高

分子材料废弃物的处理已成为亟待解决的社会难题。目前, 处理废弃高分子材料的常用方法主要包括焚烧、填埋、回

收稿日期 Submitted date 2025-04-22; 修回日期 Revised date 2025-05-18; 录用日期 Accepted date 2025-06-27

基金项目: 浙江省市场监督管理局雏鹰计划培育项目(CY2023214)

联系人, 18817656777@qq.com

引用本文: 黄金飞, 陈晨, 何晖晖, 等. 降解与抗菌高分子改性材料的研究进展[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 202-207.

Citation: HUANG J F, CHEN C, HE H H, et al. Research progress of degradable and antibacterial polymer modified materials[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 202-207.

收利用、再生及热裂解等。这些方法不仅回收成本高昂,还存在一定环境污染风险,具有明显局限性<sup>[1-5]</sup>。在此背景下,可降解材料凭借其环境友好特性,逐渐成为研究人员及相关行业关注的焦点。与此同时,公众环保和健康意识不断提升。为了顺应这一趋势,对高分子材料进行抗菌改性,并根据不同应用场景开发相应制品,已成为当前研究和应用领域的热点。例如:抗菌包装材料能够显著延长食品货架期;抗菌一次性手套可有效防止食品二次污染;抗菌织物在纺织和医用领域也展现出广阔的应用前景。

高分子材料通常采用添加抗菌剂实现抗菌改性。依据成分、来源及性质,抗菌剂可分为天然、有机和无机3大类。天然抗菌剂因无毒、生物相容性良好而备受关注,但其提取加工过程复杂、成本较高且耐热性较差。有机抗菌剂种类丰富,杀菌能力强,但大多存在耐热性不佳、毒性较大且易挥发等缺点。相比之下,无机抗菌剂凭借抗菌谱广、抗菌持久、耐候耐热性优良及无耐药性等优势,展现出广阔的应用前景<sup>[6-10]</sup>。近年来,可降解聚合物作为高分子材料的重要分支,因能在特定条件下分解为无害物质而受到广泛关注。抗菌改性不仅能够提升材料的卫生安全性,还能够有效抑制微生物生长繁殖,从而拓展其在医疗、食品包装等领域的应用。然而,目前这类材料仍面临诸多挑战,如成本较高、抗菌耐久性不足、降解条件受限及部分材料生物相容性有待提升等问题,限制其大规模推广应用。本文综述可降解和抗菌高分子材料的研究进展,旨在为相关研究提供参考,推动兼具降解与抗菌功能的高分子改性材料在环境保护和健康领域的应用。

## 1 常见的可降解高分子材料

### 1.1 聚乳酸(PLA)

PLA是一种生物降解聚合物材料。图1是PLA的分子式。与传统依赖不可再生石油资源的聚乙烯材料不同,PLA的制备以淀粉(如土豆、红薯、玉米等常见植物资源)为原料,经糖化作用转化为葡萄糖,再通过菌种发酵生成高纯度乳酸,最终经脱水缩合形成大分子聚合物<sup>[11]</sup>。

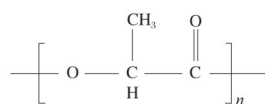


图1 PLA的分子式

Fig.1 Molecular formula of PLA

常温下,PLA呈现白色粉末状。PLA的密度为1.25~1.28 g/cm<sup>3</sup>,熔点为176 °C,玻璃化转变温度为60~65 °C,传热系数为0.025 W/(m·K),拉伸强度为40~60 MPa,断裂伸长率为4%~10%,弹性模量为3 000~4 000 MPa,弯曲模量为100~150 MPa。PLA作为一种以植物为来源的生物降解聚合物,具有良好的热稳定性、相容性、光泽度、透明性以及优异的抗溶剂性。PLA易于与其他聚合物共混加工,同时适合挤压、纺丝、双轴拉伸、注射吹塑等多种加工工艺。因此,PLA在包装、纤维、农业以及医疗卫生等领域得

到广泛应用<sup>[12]</sup>。

### 1.2 聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)

PBAT是一种石油基合成的脂肪族-芳族共聚物,兼具脂肪族聚酯的卓越生物降解性能和芳香族聚酯的优良力学性能。其制备过程是将1,4-丁二醇(BDO)、己二酸(AA)和对苯二甲酸(PTA)按照特定比例进行酯化反应,随后通过缩聚反应完成聚合。图2为PBAT的分子式。脂肪族链段赋予PBAT高延展性和断裂伸长率,使其韧性显著优于PLA等刚性材料,但脂肪族酯键的柔顺性降低了材料的拉伸强度;芳香族苯环结构则提高了材料的刚性和耐热性。在降解性能方面,脂肪族酯键可被水解酶或微生物分解,是PBAT生物降解的主要位点。

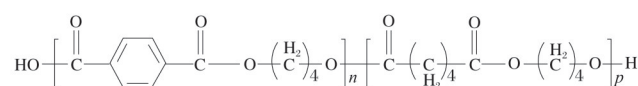


图2 PBAT的分子式

Fig.2 Molecular formula of PBAT

PBAT的密度为1.18~1.30 g/cm<sup>3</sup>,熔点为130 °C,结晶度为30%,弹性模量为20~35 MPa,拉伸强度为15~25 MPa,断裂伸长率不小于700%。其中,PBAT的断裂伸长率远远高于其他生物可降解聚酯。PBAT具有较高的柔韧性、优异的抗冲击强度和良好的熔融加工性能,成为替代传统塑料的理想选择。PBAT是目前市场上最具潜力替代聚乙烯的高分子降解材料之一,其加工特性与低密度聚乙烯(LDPE)相似,可采用吹塑成型、挤出成型和注塑成型等方式加工。PBAT具有优异的生物降解性,在自然环境中可被微生物分解为二氧化碳和水,展现出良好的环境友好性。PBAT可通过微生物(如细菌、真菌)的酶促作用分解,也可通过热降解、化学水解等方式降解。其降解速率受环境条件影响,例如在紫外光和水环境中,PBAT的机械性能和水蒸气阻隔性能会逐渐下降<sup>[13]</sup>。此外,PBAT在海洋环境中也表现出良好的降解性能,其可在温和条件下被特定酶高效降解。

PBAT是一种已实现商业化的生物降解塑料,最早由德国巴斯夫公司实现工业化生产。近年来,中国在PBAT的研发和生产方面取得显著进展,产能迅速增长<sup>[14]</sup>。截至2023年,国内PBAT年产能已超过137万t。PBAT广泛应用于农用地膜、包装膜、一次性塑料袋、一次性餐具及细胞培养电纺支架等领域。未来,PBAT有望在更多领域替代传统塑料,为解决塑料污染问题提供可持续解决方案。

## 2 抗菌剂种类

### 2.1 天然抗菌剂

天然抗菌剂主要来源于动植物体内丰富的生物活性物质。这类抗菌剂包括从动植物中提取的儿茶素、茶多酚、精油等生物活性成分以及木质素、壳聚糖和聚多巴胺等天然高分子材料。天然抗菌剂具有无毒、生物相容性好

等优点,但其提取加工过程复杂,成本较高,耐热性较差。众多学者针对天然抗菌剂的提取、应用及其抗菌性能评估开展深入研究。

### 2.1.1 植物精油

NOORI等<sup>[15]</sup>采用水蒸气蒸馏法从茴香种子中提取精油。该方法能够有效保留茴香精油中的活性成分,确保其后续应用的抗菌效能。随后,通过溶液流延法将提取所得茴香精油与PLA复合,成功制备PLA/茴香精油复合薄膜。为全面评估该复合薄膜的抗菌谱与抗菌效果,选取大肠杆菌(*E. coli*, ATCC 43895)、副溶血性弧菌(*V. parahaemolyticus*, ATCC 43996)、金黄色葡萄球菌(*S. aureus*, ATCC 25923)和李斯特菌(*L. monocytogenes*, ATCC 19111)4种代表性病原体进行抗菌性能测试。结果表明:大肠杆菌抑菌圈为(15.19±0.63) mm,副溶血性弧菌为(19.20±0.63) mm,金黄色葡萄球菌为(15.13±0.52) mm,李斯特菌为(34.34±4.01) mm。图3为含有茴香精油的PLA薄膜对4种食源性病原体的最小抑制浓度<sup>[15]</sup>。

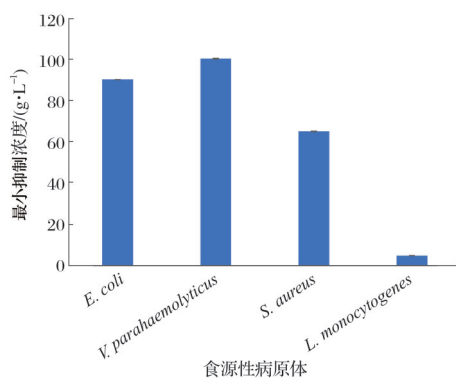


图3 含有茴香精油的PLA薄膜对4种食源性病原体的最小抑制浓度

Fig.3 Minimum inhibitory concentration of PLA film containing anise essential oil on four food borne pathogens

### 2.1.2 壳聚糖

壳聚糖是一种储量丰富的多糖类物质,其含量仅次于纤维素。壳聚糖分子结构中含有大量带正电荷的氨基基团,这一独特化学结构赋予其显著的抗菌活性。COSTA等<sup>[6]</sup>采用溶液流延法成功制备壳聚糖薄膜。抗菌测试表明,该薄膜对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌表现出强效杀菌作用,而非仅抑制细菌生长繁殖。此外,壳聚糖薄膜还对白色念珠菌表现出抗真菌活性。这表明壳聚糖的抗菌机制远超一般生长抑制效果,能够诱导细菌细胞死亡,展现出卓越的抗菌性能。壳聚糖的抗菌机制可归纳为以下几点:(1)壳聚糖分子所带正电荷与微生物细胞膜所带负电荷产生强烈静电相互作用,致使细胞内各类成分泄漏,最终引发细胞死亡,从细胞膜层面直接破坏微生物的生理结构完整性。(2)壳聚糖能够与微生物体内DNA发生特异性相互作用,干扰信使核糖核酸(mRNA)合成过程,从基因表达层面抑制微生物的正常生理功能。最后,壳聚糖还具备独

特的金属离子螯合特性<sup>[17-19]</sup>,进而影响微生物体内依赖金属离子的酶活性及相关代谢过程的正常进行,从细胞内环境稳态层面干扰微生物的生存与繁殖。

YANG等<sup>[20]</sup>合成自组装生物功能化壳聚糖衍生纳米复合材料盐酸壳聚糖-烷基酚-二氢杨梅素(CTS-APs@DMY),用于室温下持久抗菌包装。抗菌测试表明,CTS-APs对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制率分别高达86.59%和52.07%,表现出较高抑菌效果。这一显著抗菌性能主要归因于合成方法的温和性,能够在合成过程中最大限度地保留壳聚糖(CTS)和烷基酚(AP)在细菌膜上的生物活性位点。进一步研究发现,CTS-APs@DMY对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌展现出100%杀伤活性。一方面,3种天然生物质材料在CTS-APs@DMY中各司其职,充分利用各自独特活性位点实现对细菌膜破坏活性的协同增强效应,极大地提升抗菌效果。另一方面,所得粒径较小的CTS-APs@DMY纳米复合材料在溶液中具有更高表面能和活性,能够更易通过静电相互作用富集于细菌表面。这种富集效应使纳米复合材料与细菌细胞膜接触更为紧密频繁,实现更高层次的细菌渗透干扰,从而进一步增强抗菌能力。在盐焗鸡保存实验中,经CTS-APs@DMY改性的纤维纸(FP)表现出良好的延缓鸡脂质氧化和微生物屏蔽作用。改性FP能够将加工后鸡肉在室温下的贮藏时间有效延长至5 d左右。这项研究为食品保鲜领域提供一种极具潜力的新型包装材料,同时进一步验证CTS-APs@DMY纳米复合材料在实际应用中的抗菌有效性和实用性。

### 2.1.3 木质素

木质素是一种天然聚合物,存在于维管植物中<sup>[21]</sup>。作为一种可生物降解、无毒且低成本的大分子,木质素因其多功能性,如抗紫外线、生物活性抗菌和抗氧化活性等,受到广泛关注。肖力强<sup>[22]</sup>采用木质素和维生素B为原料,经曼尼希反应合成改性木质素,图4为改性木质素的反应过程。抗菌测试结果显示,该改性木质素对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌率分别达到98%和90%。进一步将改性木质素与PBAT复合制成薄膜,测试发现,薄膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的黏附浓度分别为 $3.2 \times 10^5$  CFU/mL和 $17.5 \times 10^5$  CFU/mL,仅为纯PBAT薄膜细菌黏附浓度的21%和20%,充分证明改性木质素的显著抗菌效果。天然抗菌剂复杂的提取过程和较低的耐热性限制其在高温加工环境中的应用。

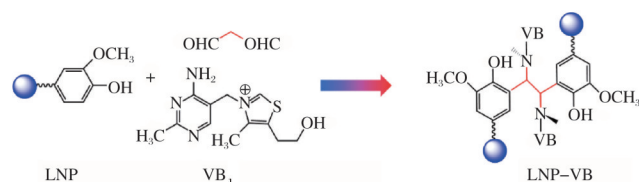


图4 改性木质素的反应过程

Fig.4 Reaction process of modified lignin

未来研究需进一步优化提取工艺,降低生产成本,并探索新的改性方法以提高其耐热性和稳定性,从而拓展天然抗菌剂在聚合物材料中的应用范围。

## 2.2 有机抗菌剂

有机抗菌剂主要包括低分子有机抗菌剂和高分子抗菌剂,其种类丰富,杀菌能力强,但大多耐热性不佳,毒性较大,易挥发。

### 2.2.1 季铵化合物

季铵化合物因杀菌作用而被广泛用作 200 多种消毒剂的活性成分<sup>[23]</sup>。阳离子季铵盐氮能够与磷脂的阴离子头部基团及细菌细胞壁中带负电荷的结构蛋白发生强烈相互作用,从而导致细胞快速裂解。MOHAPATRA 等<sup>[24]</sup>采用引发化学气相沉积(iCVD)法合成聚乙烯苜基氯-共聚-甲基丙烯酸二甲氨基乙酯(PVBC-co-DMAEMA),并引入季铵基团。抗菌测试结果表明,该薄膜对大肠杆菌和谷氨酸棒状杆菌的接触杀伤率超过 99.5%,且未检测到薄膜成分浸出,显示出优异的抗菌性能和良好的稳定性。

### 2.2.2 含吡啶基团的化合物

含吡啶基团的化合物也是一类具有抗菌作用的物质,其抗菌性能主要取决于吡啶环上取代基碳链长度及相应吡啶的酸解离常数<sup>[25]</sup>。MA 等<sup>[26]</sup>采用三步法合成一种兼具杀菌活性和抗菌黏附性的阳离子 4-乙烯基吡啶聚合物纳米球(CvpPMs),并将其作为涂层涂覆于薄膜表面。检测结果显示,涂覆 CvpPM 涂层的大肠杆菌组抗菌率达 95%,金黄色葡萄球菌组更是达到 100%,表明 CvpPM 的存在对细菌生长和定植产生显著影响,有效抑制细菌的繁殖和附着。

有机抗菌剂的高毒性、挥发性和较差的耐热性限制其在一些对安全性要求较高领域的应用。未来研究需要开发低毒性、高耐热性的有机抗菌剂,并探索其在不同高分子材料中的应用潜力,以满足多样化的市场需求。

## 2.3 无机抗菌剂

无机抗菌剂主要包括金属离子(如银、铜、锌)及其化合物,具有抗菌谱广、抗菌持久、耐候耐热性优良及无耐药性等优势。无机纳米颗粒在聚合物基体中的应用为材料全面改进提供了可能<sup>[27-28]</sup>。其中,金属纳米颗粒和金属氧化物纳米颗粒的研究尤为热门。

### 2.3.1 金属纳米颗粒

聚合物复合材料可通过整合银、金、铜和锌等金属纳米颗粒实现抗菌效果<sup>[29-30]</sup>。银纳米颗粒(AgNPs)因其广谱抗菌活性、低毒性和相对较低成本成为研究最为广泛的抗菌金属纳米颗粒<sup>[31]</sup>。其抗菌机制主要包括:(1)当 AgNPs 溶解于水溶液中时,Ag<sup>+</sup>与细菌细胞壁和质膜蛋白质中的硫和磷基团结合,导致蛋白质功能障碍,威胁生物体生命<sup>[32]</sup>。(2)Ag<sup>+</sup>还能够通过与带负电荷组分结合在微生物膜上形成孔洞,导致细胞质内容物流出,最终引发细胞死亡<sup>[33]</sup>。(3)细胞内 Ag<sup>+</sup>会干扰细菌电子传递链功能,与细菌

DNA 和 RNA 相互作用,抑制细胞分裂<sup>[34]</sup>。

宋洪泽等<sup>[35]</sup>将纳米银负载于二氧化硅上,制备纳米复合抗菌剂,并将其与高密度聚乙烯(HDPE)共混挤出、造粒,最后在注塑机中压制制成 2 mm 片材。抗菌测试结果表明,添加纳米银复合抗菌剂的 HDPE 表现出明显的细菌抑制作用,对大肠杆菌抑制率约为 74.0%。CUI 等<sup>[36]</sup>开发一种新型银离子-纳米银复合抗菌添加剂,将银纳米颗粒化学键合到 Ag、Cu 和 Zn 三元离子交换沸石上,并用  $\alpha$ -硫辛酸和亲水性聚合物进行封装,实现 Ag<sup>+</sup>和 AgNPs 的协同抗菌效果。实验结果表明,该新型添加剂对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌和白色念珠菌表现出超过 99.99% 的抗菌率。ZHAO 等<sup>[37]</sup>采用微波辐射法合成聚乙二醇化氧化石墨烯负载 AgNPs 复合材料(GO-PEG-Ag)。实验结果表明,GO-PEG-Ag 对标准菌株和耐药菌株(包括携带 *bla*NDM-1 和 *mcr*-1 基因的大肠杆菌及耐甲氧西林金黄色葡萄球菌)的抗菌效果显著优于其他材料,且对 HeLa 细胞毒性较低,即使在 50 mg/L 高浓度下,细胞存活率仍保持在 80% 左右。

### 2.3.2 金属氧化物纳米复合材料

金属氧化物纳米复合材料在抗菌和抗病毒材料中也具有较高的应用潜力<sup>[38]</sup>。金属氧化物的抗菌作用包括释放阳离子、诱导生物分子损伤、消耗 ATP 及与细胞膜相互作用等,这些过程共同作用可有效根除细菌<sup>[39]</sup>。

ZnO 是最具发展前景的纳米材料之一,其具有优异的抗菌性能、良好的化学稳定性、生物相容性、光学和紫外线屏蔽能力、低廉的价格及广泛的来源。ZnO 纳米颗粒对大肠杆菌、铜绿假单胞菌和金黄色葡萄球菌等多种微生物均表现出抗菌能力,在包装、纺织和医学等领域具有广泛应用前景<sup>[40]</sup>。ZHENG 等<sup>[41]</sup>采用直接沉淀法制备 ZnO/Ag@SiO<sub>2</sub> 无机纳米杂化抗菌剂,并以聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)为纤维基质,采用熔融纺丝技术制备 PET/ZnO/Ag@SiO<sub>2</sub> 纤维。抗菌性能测试表明,改性 PET 纤维对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌表现出极高的抗菌活性,最高可达 99.9%。即使经过 50 次水洗后,该纤维对金黄色葡萄球菌的抗菌率仍维持在 95.7%,对大肠杆菌的抗菌率也高达 94.8%,显示出优异的抗菌耐久性。SU 等<sup>[42]</sup>采用溶液吹丝技术制备高效抗菌 PLA 基纤维材料,并调控材料的孔隙率。抗菌测试结果显示,多孔结构抗菌 PLA 基纤维材料对大肠杆菌的抗菌率最高可达 99.99%,而无孔隙材料仅为 55.11%。对枯草芽孢杆菌的抗菌测试结果表明,多孔结构试样最高抗菌率为 98.88%,无孔隙材料则为 52.68%。与无孔 PLA 基纤维相比,多孔 PLA 基纤维中的抗菌剂更易从纤维内部释放,从而有效杀灭病原微生物。

TiO<sub>2</sub> 因其优异的光稳定性、光催化活性、无毒、安全性、化学稳定性和出色的抗菌性能而成为一种被广泛研究的材料。在抗菌活性方面,TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒能够消除多种微生物,包括真菌、原生动物、革兰氏阳性和革兰氏阴性细

菌、病毒及噬菌体<sup>[43]</sup>。姜悦等<sup>[44]</sup>制备纳米 TiO<sub>2</sub> 改性的 LDPE 薄膜,该薄膜不仅具有良好的力学性能,还展现出显著的抑菌性能。当纳米 TiO<sub>2</sub> 添加质量分数为 2.5% 时,鲢鱼肉在(4±1) °C 下保存 8 d 后,菌落总数仅为 5.9×10<sup>6</sup> CFU/g;而添加质量分数为 0.5% 时,第 4 d 菌落总数已超过淡水鱼可食用标准。这表明纳米 TiO<sub>2</sub> 改性的 LDPE 薄膜对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等导致食物腐败的细菌具有显著的杀菌抑制作用。KRUMDIECK 等<sup>[45]</sup>采用脉冲压力金属有机化学气相沉积技术制备一种具有可见光抗菌活性的纳米结构 TiO<sub>2</sub> 涂层。在可见光照射下,涂层对大肠杆菌表现出超过 99.9% 的抗菌效果;即使在黑暗中,涂层也展现出 99.0% 的抗菌效果。CELEBI 等<sup>[46]</sup>采用无配体一步法制备 Au/TiO<sub>2</sub> 纳米结构材料,在 150 min 内对亚甲蓝的降解率达到 97.0%,而纯 TiO<sub>2</sub> 仅为 25.0%。WEI 等<sup>[47]</sup>采用简单的溶剂热法制备具有可控结晶和性能的 Ag/TiO<sub>2</sub> 纳米复合材料,利用表面增强拉曼散射技术监测 4-硝基苯硫醇在硼氢化钠存在下被 Ag/TiO<sub>2</sub> 纳米复合材料催化还原的过程。结果表明:4-硝基苯硫醇的硝基在 20 min 内被完全还原为氨基。

无机抗菌剂凭借其抗菌谱广、抗菌持久、耐候耐热性优良及无耐药性等优势,展现出极为广阔的应用前景。其较高的稳定性使其在高温加工和长期使用中表现出色,但高成本和复杂的制备工艺仍是亟待解决的问题。此外,无机抗菌剂的生物相容性和环境影响也需进一步研究。未来研究方向应集中在开发低成本、高效率的无机抗菌剂制备方法,并深入研究其不同应用场景中的性能和安全性,以推动无机抗菌剂在材料改性中的广泛应用。

### 3 结论

目前,研究人员已广泛利用天然、无机和有机抗菌剂对高分子材料进行改性,这些改性材料在纺织、医学、包装等领域具有重要的现实意义。天然精油以及从植物中提取的木质素、壳聚糖等成分,因其来源广泛且环境友好,在材料中展现出优异的抗菌性能。合理设计分子链结构,将季铵盐等有机抗菌基团嵌入并实现化学键合,能够赋予高分子材料卓越的抗菌能力。此外,将无机抗菌颗粒与高分子基材复合也为新型复合材料带来了广谱抗菌特性。然而,单一类型的抗菌剂往往存在局限性,难以满足多元化应用场景的需求。因此,开发融合天然、有机和无机 3 类抗菌剂优势的新型复合抗菌剂,将成为未来的重要发展方向。将两类或三类物质进行复合可以实现协同增效的效果。同时,研究人员还应从更宏观的角度审视抗菌高分子材料的全生命周期,如简化制备工艺、深入剖析抗菌机理、评估抗菌成分析出后对生态环境的影响等关键问题。

### 参考文献

[1] 刘洋,王婷,蔡庆,等.可降解聚己二酸对苯二甲酸丁二酯酯/天然橡

- 胶生物基复合材料性能的研究[J]. 橡胶工业, 2024, 71(12): 919-924.
- [2] 甄智勇,张陆祥,袁煜,等.增容剂 DT 对 PLA/PBAT 共混物性能的影响[J]. 中国塑料, 2016, 30(3): 88-93.
- [3] CHEN X, YAN N. A brief overview of renewable plastics[J]. *Materials Today Sustainability*, 2020, 7: 100031.
- [4] OKADA M. Chemical syntheses of biodegradable polymers[J]. *Progress in Polymer Science*, 2002, 27(1): 87-133.
- [5] JAMBECK J R, GEYER R, WILCOX C, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. *Science*, 2015, 347: 768-771.
- [6] HU L L, HE L L, CAI L, et al. Deterioration of single-use biodegradable plastics in high-humidity air and freshwaters over one year: Significant disparities in surface physicochemical characteristics and degradation rates[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 465: 133170.
- [7] IBRAHIM S, MASOUD A M, EL-MAADAWY M M, et al. Recycling waste polymer packaging materials as effective active carbon porous materials for uranium removal from commercial phosphoric acid[J]. *Radiochimica Acta*, 2024, 112(2): 95-109.
- [8] BOOMA M, SELKE S E, GIACIN J R. Degradable plastics[J]. *Journal of Elastomers & Plastics*, 1994, 26(2): 104-142.
- [9] MARTÍNEZ-NARRO G, HASSAN S, PHAN A N. Chemical recycling of plastic waste for sustainable polymer manufacturing: A critical review[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(2): 112323.
- [10] ZEGEYE L H, ATALIE D. Recycling of polycarbonate/acrylonitrile butadiene styrene blends with flame retardant additives for 3D printing filament[J]. *Journal of Engineering*, 2024, 2024(1): 2084718.
- [11] 何晓东,余万能,姚志敏.聚对苯二甲酸丁二酯醇的合成及其改性[J]. *化工新型材料*, 2003, 31(11): 20-22.
- [12] 徐松,王敬敬,周婷婷,等.聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯塑料地膜高效降解菌群筛选及其群落结构演替特征[J]. *微生物学通报*, 2018, 45(11): 2341-2352.
- [13] 严旒娜,郑志雨,徐锐,等.PBAT 基生物降解地膜在紫外与水环境中的性能演变[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(4): 239-248.
- [14] 刘云春,朱平,张甜甜,等.抗菌性聚乳酸复合膜的制备和性能研究进展[J]. *塑料科技*, 2024, 52(2): 119-123.
- [15] NOORI N, KHANJARI A, REZAEIGOLESTANI M, et al. Development of antibacterial biocomposites based on poly(lactic acid) with spice essential oil (pimpinella anisum) for food applications[J]. *Polymers*, 2021, 13(21): 3791.
- [16] COSTA S M, FERREIRA D P, TEIXEIRA P, et al. Active natural-based films for food packaging applications: The combined effect of chitosan and nanocellulose[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 177: 241-251.
- [17] AL-TAYYAR N A, YOUSSEF A M, AL-HINDI R. Antimicrobial food packaging based on sustainable bio-based materials for reducing foodborne Pathogens: A review[J]. *Food Chemistry*, 2020, 310: 125915.
- [18] RIAZ A, LAGNIKA C, LUO H, et al. Chitosan-based biodegradable active food packaging film containing chinese chive (allium tuberosum) root extract for food application[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 150: 595-604.
- [19] INANLI A G, TÜMERKAN E T A, ABED NEL, et al. The impact of chitosan on seafood quality and human health: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 97: 404-416.

- [20] YANG J X, CHEN G W, CHEN J H, et al. Self-assembled bifunctionalized chitosan-derived nanocomposite for long-lasting antibacterial packaging at room temperature[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2024, 12(1): 561-571.
- [21] BIKIARIS N D, KOUMENTAKOU I, LYKIDOU S, et al. Innovative skin product O/W emulsions containing lignin, multiwall carbon nanotubes and graphene oxide nanoadditives with enhanced sun protection factor and UV stability properties[J]. Applied Nano, 2022, 3(1): 1-15.
- [22] 肖力强. 木质素抗菌活性增效及其与 PBAT 的复合性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
- [23] SHU H N, CHEN P Y, YANG R. Advances in antibacterial polymer coatings synthesized via chemical vapor deposition[J]. Chem & Bio Engineering, 2024, 1(6): 516-534.
- [24] MOHAPATRA S, LIN Y T, GOH S G, et al. Quaternary ammonium compounds of emerging concern: Classification, occurrence, fate, toxicity and antimicrobial resistance[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 445: 130393.
- [25] 张靖坤, 王好盛, 刘海弟, 等. 离子液体抗菌剂的研究进展[J]. 化工新型材料, 2017, 45(7): 45-47.
- [26] MA X B, SUN X B, LI T, et al. Cationic 4-vinylpyridine copolymer nanospheres with dual active centers for antibacterial coatings[J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(17): 21083-21093.
- [27] JIANG L, WEN Y Y, ZHU Z J, et al. Construction of an efficient nonleaching graphene nanocomposites with enhanced contact antibacterial performance[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 382: 122906.
- [28] WANG Y W, CAO A N, JIANG Y, et al. Superior antibacterial activity of zinc oxide/graphene oxide composites originating from high zinc concentration localized around bacteria[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(4): 2791-2798.
- [29] RECIO-SÁNCHEZ G, SEGURA A, BENITO-GÓMEZ N, et al. Composite thin films of nanoporous silicon/green synthesized silver nanoparticles as antibacterial surface[J]. Materials Letters, 2022, 324: 132734.
- [30] NIKOLOVA M P, CHAVALI M S, NIKOLOVA M P, et al. Metal oxide nanoparticles as biomedical materials[J]. Biomimetics, 2020, 5(2): 27.
- [31] GHAZZY A, NAIK R R, SHAKYA A K, et al. Metal-polymer nanocomposites: A promising approach to antibacterial materials[J]. Polymers, 2023, 15(9): 2167.
- [32] PRIYADARSHINI S, GOPINATH V, MEERA PRIYADHARSSHINI N, et al. Synthesis of anisotropic silver nanoparticles using novel strain, *Bacillus flexus* and its biomedical application[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2013, 102: 232-237.
- [33] SLAVIN Y N, ASNIS J, HÄFELI U O, et al. Metal nanoparticles: Understanding the mechanisms behind antibacterial activity[J]. Journal of Nanobiotechnology, 2017, 15(1): 65.
- [34] DAKAL T C, KUMAR A, MAJUMDAR R S, et al. Mechanistic basis of antimicrobial actions of silver nanoparticles[J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7: 1831.
- [35] 宋洪泽, 林勤保, 黄崇杏, 等. 纳米载银二氧化钛表面改性对 HDPE 片材性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(6): 934-940.
- [36] CUI J X, SHAO Y Y, ZHANG H P, et al. Development of a novel silver ions-nanosilver complementary composite as antimicrobial additive for powder coating[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 420: 127633.
- [37] ZHAO R T, LV M, LI Y, et al. Stable nanocomposite based on PEGylated and silver nanoparticles loaded graphene oxide for long-term antibacterial activity[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(18): 15328-15341.
- [38] DEMCHENKO V, KOBYLINSKYI S, IURZHENKO M, et al. Nanocomposites based on polylactide and silver nanoparticles and their antimicrobial and antiviral applications[J]. Reactive and Functional Polymers, 2022, 170: 105096.
- [39] IPPILI S, JUNG J S, THOMAS A M, et al. An overview of polymer composite films for antibacterial display coatings and sensor applications[J]. Polymers, 2023, 15(18): 3791.
- [40] GUDKOV S V, BURMISTROV D E, SEROV D A, et al. A mini review of antibacterial properties of ZnO nanoparticles[J]. Frontiers in Physics, 2021, 9: 641481.
- [41] ZHENG S Y, CHEN W, SHI C, et al. Thermostable ZnO/Ag@SiO<sub>2</sub> nanohybrid material for extraordinary antibacterial activity polyester fibers[J]. Polymer Engineering & Science, 2024, 64(1): 386-398.
- [42] SU X L, ZHAI Y L, JIA C, et al. Improved antibacterial properties of poly(lactic acid)-based nanofibers loaded with ZnO-Ag nanoparticles through pore engineering[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(36): 42920-42929.
- [43] BIKIARIS N D, KOUMENTAKOU I, SAMIOTAKI C, et al. Recent advances in the investigation of poly(lactic acid) (PLA) nanocomposites: Incorporation of various nanofillers and their properties and applications[J]. Polymers, 2023, 15(5): 1196.
- [44] 姜悦, 杨福馨. Nano-TiO<sub>2</sub> 改性 PE-LD 复合抗菌薄膜制备与性能研究[J]. 中国塑料, 2019, 33(7): 26-31.
- [45] KRUMDIECK S P, BOICHOT R, GORTHY R, et al. Nanostructured TiO<sub>2</sub> anatase-rutile-carbon solid coating with visible light antimicrobial activity[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 1883.
- [46] CELEBI N, AYDIN M Y, SOYSAL F, et al. Ligand-free fabrication of Au/TiO<sub>2</sub> nanostructures for plasmonic hot-electron-driven photocatalysis: Photoelectrochemical water splitting and organic-dye degradation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 860: 157908.
- [47] WEI W X, YU D, HUANG Q L. Preparation of Ag/TiO<sub>2</sub> nanocomposites with controlled crystallization and properties as a multifunctional material for SERS and photocatalytic applications[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 243: 118793.