

面向绿色物流包装的可生物降解薄膜研究现状

袁文斌¹, 黄山¹, 杨义银¹, 张珊², 李洁², 杨莉²

(1.陕西省烟草公司西安市公司, 西安 710100; 2.长安大学 水利与环境学院旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

摘要: **目的** 为了适应物流包装绿色转型的需求, 综述可生物降解薄膜作为绿色包装材料的最新研究进展和应用现状, 展示其在绿色物流包装体系中的发展机遇和巨大潜力。**方法** 通过追踪国内外相关文献和新闻报道, 紧扣绿色物流包装的内涵和要求, 对可生物降解薄膜的种类、性能评价及实际物流包装场景中的应用现状进行分析总结, 阐释目前可生物降解薄膜作为绿色包装材料的最新研究进展。**结论** 兼具优良力学性能和生物降解性的可生物降解薄膜是物流包装绿色转型中的重要研究方向, 随着我国未来在该领域工艺研发和生产技术水平的不断成熟, 可生物降解薄膜包装材料将会广泛应用于绿色物流场景中。

关键词: 绿色物流包装; 可生物降解; 薄膜包装; 物流包装场景

中图分类号: TQ317; TB484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)21-0058-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.21.008

Research Progress on Biodegradable Films Involved in Green Logistics Packaging

YUAN Wen-bin¹, HUANG Shan¹, YANG Yi-yin¹, ZHANG Shan², LI Jie², YANG Li²

(1. Xi'an Company of Shaanxi Tobacco Company, Xi'an 710100, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas of Ministry of Education, School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

ABSTRACT: The work aims to review the latest research progress and application status of biodegradable films as green packaging materials, demonstrate the development prospects and great potential of biodegradable films in green logistics packaging system, so as to meet the demand of green transformation of logistics packaging. By tracking relevant literature and news reports at home and abroad, the work focused on the connotation and requirements of green logistics packaging. The types, performance evaluation and application status of biodegradable films in actual logistics packaging scenarios were analyzed and summarized. The recent research development of biodegradable films as green packaging materials was illustrated. Study on the biodegradable film with outstanding mechanical properties and biodegradability turns out to be an important aspect in green transformation of logistics packaging. With the improvement in the processing development and production technology, there will be wide popularization and application prospects of biodegradable film packaging materials in various logistics scenarios.

收稿日期: 2022-04-01

基金项目: 中国烟草总公司陕西省公司揭榜挂帅项目(KJ-2021-10); 烟草商业企业物流碳排放评估与低碳技术应用研究(揭榜挂帅项目)(KJ-2022-08)

作者简介: 袁文斌(1975—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为烟草商业物流绿色包装材料。

通信作者: 杨莉(1977—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为新型环境友好材料。

KEY WORDS: green logistics packaging; biodegradable; film packaging; logistics packaging scene

20 世纪中叶以来, 随着中国经济的快速发展和科技水平的显著提高, 物流包装的种类不断丰富、形式推陈出新, 迎来了蓬勃发展的黄金时代。在包装材料中, 塑料薄膜因具有防潮抗氧化、灵活耐用和轻质透明等优势^[1-2], 被广泛应用于食品、饮料、医药、日用百货等众多产品的生产线和物流包装场景中。据中国塑料薄膜行业统计, 2020 年中国包装塑料薄膜的产量约为 1 070.3 万 t, 占塑料薄膜总产量的 71.2%, 较 2019 年的 1 061.6 万 t, 同比增长了约 0.82%。传统物流包装所使用的薄膜材料(如聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯等^[3])是不可降解的高分子材料, 这类薄膜在完成包装使命后会被大量废弃、焚烧或填埋, 由此所导致的土壤板结、水质恶化和空气污染等环境问题日益凸显^[4]。

2020 年, 国家发改委、生态环境部出台了《关于进一步加强塑料污染治理的意见》和《关于扎实推进塑料污染治理工作的通知》, 从“禁限”“推广”“规范”三方面着手, 积极应对塑料污染。其中, 开发绿色物流包装材料被认为是保护生态环境、促进绿色低碳可持续发展的主要途径^[5]。近年来, 植物纤维发泡制品、蜂窝纸板制品、轻量化玻璃和可生物降解薄膜等众多绿色物流包装材料不断涌现。其中, 以聚羟基脂肪酸酯(PHA)^[6]、聚乳酸(PLA)^[7-8]、聚己内酯(PCL)^[9]和淀粉基^[10-11]为代表的可生物降解薄膜, 以其优良的使用性能和可被微生物降解的特点在物流包装领域占据着重要地位。与传统包装材料相比, 可生物降解薄膜能在发挥包装功能的同时, 最大程度地解决了传统薄膜回收困难、填埋后会破坏土壤结构等问题, 因此可生物降解薄膜必将引领绿色物流包装材料的发展潮流, 为推进绿色物流建设、筑牢物流高质量发展奠定绿色根基。

基于此, 文中从绿色物流包装的内涵和要求出发, 综述了可生物降解薄膜的概况, 其降解性能的评价方法, 以及在部分物流场景中的实际应用现状, 对可生物降解薄膜未来的发展进行了展望, 以期挖掘可生物降解薄膜作为新型绿色包装材料的应用价值, 推动绿色物流包装材料的发展。

1 绿色物流包装的内涵和要求

绿色物流指在流通加工、装卸、包装、储存和运输等一系列过程中抑制物流对环境造成危害(如包装材料不可降解、运输过程中燃油消耗引起的大气污染等)的同时, 实现低碳排放、节能降耗、净化环境, 并实现物流资源充分利用的一种物流活动^[12]。作为绿色物流的重要组成部分, 绿色包装指在满足包装功能要求的前提下, 从包装材料制造到使用直至废弃的全生命周期中, 对生态环境和人体健康无公害, 并能重复

使用再生、符合可持续发展的包装^[13]。将二者有效结合的绿色物流包装指从环境保护的角度对包装进行改进, 融入可持续发展、生态经济学和生态伦理学等多种理论, 形成的一个与环境共生型的物流包装系统。绿色物流包装具备环保和可再生双重功能, 在设计时应遵循包装减量化(Reduce)、包装重复使用(Reuse)、循环再生(Recycle)、回收利用(Recover)和包装废弃物可降解(Degradable)的“4R1D”原则^[12-14]。同时, 绿色物流包装注重全局与长远利益, 不仅需要满足环境保护的需求, 而且必须做到现代化、合理化和人性化等诸多方面的要求, 以实现人类长期持续和谐发展, 达到环境与物流包装的共同发展, 旨在以资源最优配置理论和可持续发展战略为基础, 在实现企业效益最大化的同时实现社会效益的最大化。

为了积极响应国家的绿色发展理念, 我国一些大型物流企业已采取了行动, 例如京东物流的“青流计划”、菜鸟的“绿色物流 2020 计划”、苏宁物流的“青城计划”等^[15]。这些绿色物流计划的实施均秉承“减量化”“无害化”“资源化”的开发原则, 践行绿色物流包装的相关要求, 加快了物流包装绿色转型的进程。在目前大量使用的绿色包装材料中, 可生物降解薄膜在满足产品包装需求的同时, 在废弃后还能够被微生物降解, 而不会对环境造成污染^[16], 是面向绿色物流包装的重要选择, 对可生物降解薄膜的深度开发及应用是物流包装绿色转型中的重要研究方向。

2 可生物降解薄膜

可生物降解薄膜是一类具有优良的使用性能、废弃后能被环境中微生物分泌的酶降解、最终被无机化而成为自然界碳素循环组成部分的高分子材料^[1]。可生物降解薄膜的生物降解过程较复杂, 通常包含 3 个阶段: 微生物黏附、生物破碎、微生物同化及矿化等^[17], 如图 1 所示。在第 1 阶段, 可生物降解高聚物材料一方面被微生物黏附或酶降解引发的生物侵蚀, 另一方面受到机械降解、光降解和化学氧化等非生物手段的攻击而破损, 2 种方式的共同作用使其失去了物理和结构特性, 出现如开裂、孔洞、变色等现象。在第 2 阶段, 随着生物降解过程的发生, 微生物会释放出酶(通常有脂肪酶、角质酶或蛋白酶), 直接水解聚合物, 并进一步分解为低分子量组分或游离单体, 使其进入细胞内, 进一步被生物降解。在第 3 阶段, 将同化的单体作为碳源和能源, 从而转化为细胞生物量、CO₂、CH₄ 和 H₂O 等。据报道, 可生物降解薄膜大致有 10 余种^[18], 根据薄膜的降解机理和程度, 将可生物降解薄膜分为生物破坏性降解薄膜和完全生物降解薄膜。

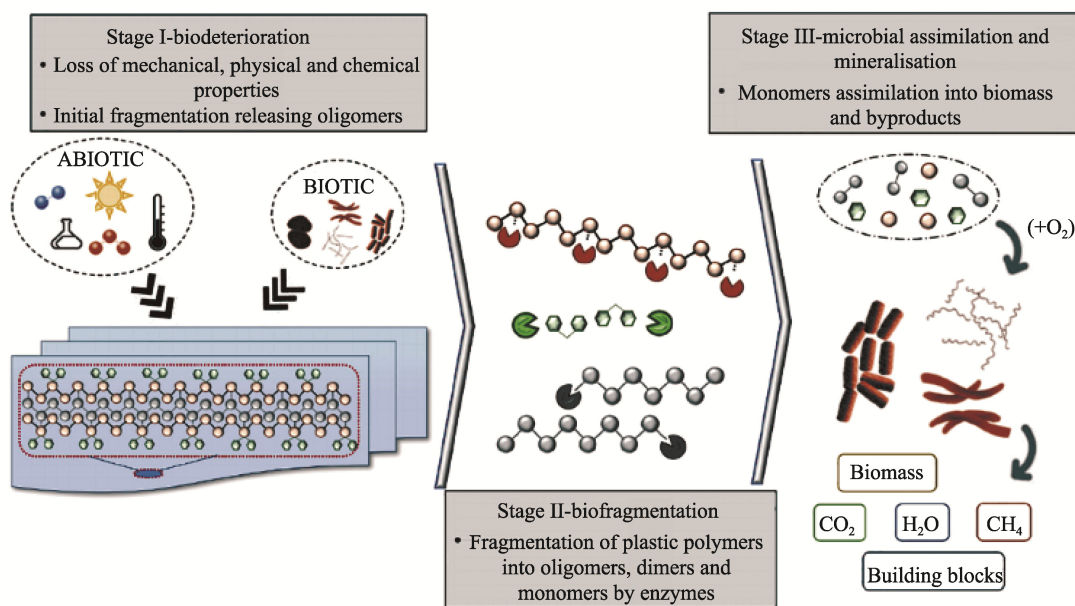


图 1 可生物降解薄膜的生物降解过程^[17]
Fig.1 Biodegradation process of biodegradable films^[17]

2.1 可生物降解薄膜的种类

2.1.1 生物破坏性降解薄膜

生物破坏性降解薄膜也称不完全生物降解薄膜。这种薄膜是在传统薄膜（如聚乙烯、聚丙烯等）中加入一些具有生物降解特质的物质（如淀粉、蛋白质和纤维素等）后，通过共混或共聚等方法所得，其降解主要依靠添加的具有生物降解特质的物质，而传统的石油基薄膜由于碳-碳 σ 键的存在^[19]，仍然会残留，从而造成污染，因此并没有从根本上解决塑料的“白色污染”问题。

2.1.2 完全生物降解薄膜

完全生物降解薄膜是由天然高分子（如淀粉、纤维素、甲壳质）或农副产品经微生物发酵或合成的具有完全生物降解性能的薄膜^[20]。例如 PHA 基、淀粉基、PLA 基、PCL 基、明胶基等常见的完全生物降解薄膜，其原料来源广泛且安全无毒，通常以共混的手段添加淀粉、聚乙烯醇（PVA）等具有生物相容性的物质，并通过改性提升其拉伸强度和断裂伸长率。如 Mangaraj 等^[21]采用玉米淀粉对 PLA 进行了共混改性，实现了玉米淀粉/PLA 可生物降解复合膜力学性能的提升，可与传统的石油基薄膜相媲美。此外，完全生物降解薄膜所含的极性高分子材料易与酶分子黏附，有助于在自然环境下（如特定微生物、温度和湿度）膜材的快速降解，且降解产物对环境无害^[22]。由此可见，完全生物降解薄膜是绿色物流包装的首选材料。

2.2 常见的完全生物降解薄膜

2.2.1 PHA 基完全生物降解薄膜

聚羟基脂肪酸酯（PHA）是一类通过微生物储存碳源和合成能量的线性聚酯^[23]，其结构通式见图 2。组成 PHA 的单体组分和比例差异赋予了材料物理和化学性能的多样化，尤其体现在通式中 R 基的差异，R 基可为单个原子、饱和长链烷烃或功能性官能团（如碳-碳双键、苯环、叠氮、环氧乙烷等）。根据构成 PHA 单体的碳原子数，将 PHA 大体分为 2 种：单体由 3~5 个碳原子组成的短链 PHA，常见的有聚羟基丁酸酯（PHB）、聚羟基戊酸酯（PHV）等；单体由 6~14 个碳原子组成的中长链 PHA，包括聚羟基己酸酯（PHH_x）、聚羟基辛酸酯（PHO）等。其中，PHB 和 PHV 是 PHA 家族中研究和应用较广泛的 2 种多聚体。

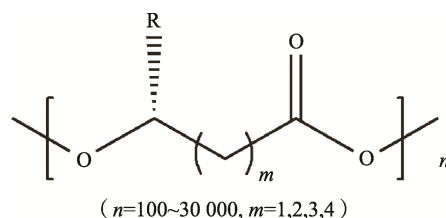


图 2 PHA 的结构通式
Fig.2 General molecular formula of PHA

PHA 作为一种具有光学活性的聚酯，不仅具有高分子化合物的基本特征，还具有生物可降解性和生物相容性^[24]。然而，PHA 具有结晶速度较慢、晶体

尺寸较大、晶核密度较低等特点, 导致其机械强度较低、脆性较大。此外, PHA 还存在生产成本高和产能低等问题, 这都在一定程度上限制了其广泛应用。为了拓宽 PHA 的应用, 研究者主要从 2 个方面入手: 一方面利用基因工程手段改造生产菌种, 利用极端条件发酵, 以及利用低品种原料进行混菌发酵等^[25]手段, 尽量降低 PHA 的成本; 另一方面, 通过物理共混和借助化学共聚生成嵌段聚合物或接枝聚合物等方式对其进行改性, 例如与聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯 (PBAT)、淀粉等高分子材料的共混, 可在改善 PHA 的脆性和柔韧性等力学性能的同时降低其成本。Duangphet 等^[26]将 PBAT 与 PHBV 共混, 研究表明, PBAT 的掺入对 PHBV 的晶体结构不会产生影响, 但 PHBV 晶体在生长过程中的核密度会降低, 导致复合体系的晶体生长速率延迟。Don 等^[27]的研究表明, 将聚醋酸乙烯酯 (PVAC)-改性淀粉与 PHB 共混, 得到的新共混材料的断裂伸长率由 1.1% 提高至 21.3%, 拉伸强度提高了 50% 以上, 且热稳定性也得到明显提升。

2.2.2 淀粉基完全生物降解薄膜

淀粉是由葡萄糖分子聚合而成的一种多羟基的亲水天然高分子碳水化合物, 一般分为直链淀粉和支链淀粉^[28]。其中, 直链淀粉可以制成柔软性好、强度高和透明度好的薄膜, 它一直是国内外的研究热点。

与其他生物降解聚合物相比, 淀粉具有来源广泛、价格低廉、易生物降解等优点, 因而在生物可降

解材料中具有重要的地位。由于天然淀粉没有热塑性, 且含有大量的羟基, 使其难以熔融加工, 在与其他聚合物共混时的相容性较差^[28-29], 因此学者们通过在淀粉中加入各种类型的增塑剂 (如甘油、尿素和山梨糖醇等) 来改变淀粉分子内部的结晶结构, 并打乱其双螺旋结构^[30] (见图 3), 以降低淀粉的熔融温度, 进而获得有热塑性的全淀粉薄膜 (TPS)。Ivanič 等^[31]利用甘油和尿素等 2 种增塑剂与 TPS 共混, 结果表明, 尿素和甘油的存在可以提高淀粉的玻璃化转变温度, 赋予 TPS 更高的拉伸强度。此外, 针对改性的淀粉力学性能和耐水性能较差等问题, 研究人员将改性淀粉与其他生物可降解材料 (如纤维素、聚己内酯等) 共混, 在保证整体可降解性能的前提下提高了材料的各项性能, 满足了实际应用要求。Dang 等^[32]使用吹塑法制备了壳聚糖浓度不同的热塑性淀粉/壳聚糖 (TPS/CTS) 薄膜, 发现壳聚糖的存在不仅改善了薄膜对水蒸气和氧气的阻隔性能, 而且降低了膜表面的亲水性。

2.2.3 PLA 基完全生物降解薄膜

聚乳酸 (PLA) 是以乳酸为原料聚合得到的聚合物, 也称聚丙交酯。由于手性碳原子的存在, 聚乳酸具有 3 种立体构型, 分别是聚左旋乳酸 (PLLA)、聚右旋乳酸 (PDLA) 和聚消旋乳酸 (PDLLA) 等, 结构如图 4 所示。其中, PDLLA 不具有光学活性, 是无定形聚合物; PLLA 和 PDLA 具有旋光性, 其机械强度和结晶度较高, 常被用于制造半结晶性的热塑性聚合物材料。

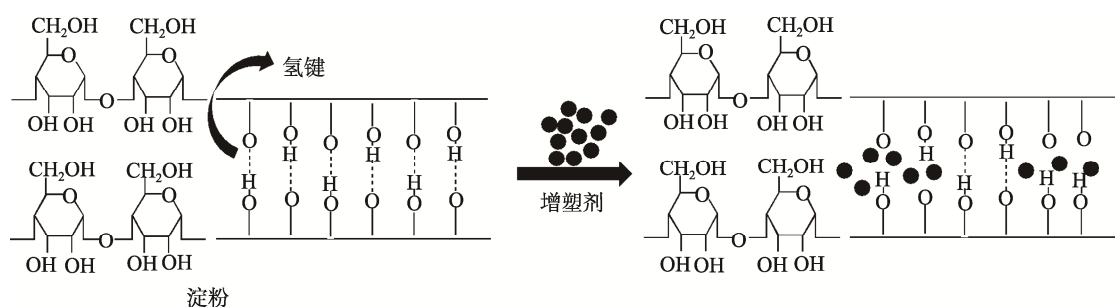


图 3 淀粉塑化的原理^[30]
Fig.3 Schematic of starch plasticization^[30]

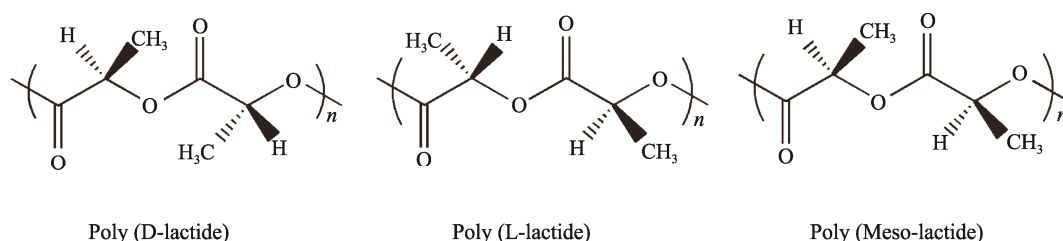


图 4 PLA 的结构
Fig.4 Structure of PLA

作为一种新型的生物降解材料,PLA 具有优良的延展性、透气性、热塑性、生物降解性和生物相容性等,且其热稳定性好、易于加工,从而得到了广泛关注^[33]。然而,纯 PLA 的质地较硬且脆,它具有典型的脆性断裂特征^[34],并且其亲水性较差,使其降解速率受限,这些不足大大限制了其在绿色物流包装中的推广应用。针对这些不足,学者们主要通过共聚、共混和增塑等方法对 PLA 进行改性,实现 2 种或多种物质的性能互补。胡宽等^[34]在 PLA 中加入柔性生物聚酯聚丁二酸丁二醇酯(PBS)和生物基弹性体氯醚橡胶(ECO),将其作为增韧改性剂,其共混物相微观形貌(见图 5)显示,添加 ECO 能有效促进 PBS 和 PLA 的界面相容性,使 PLA/PBS/ECO 三元共混体系的相分离程度下降,说明共混是获得高性能生物基材料的有效手段。Castillejos 等^[35]采用开环聚合的方法合成了 PLA 和聚丙二醇二缩水甘油醚(PPGDGE₃₈₀)的共聚物,结果表明,通过控制二者的比例能得到从弱弹性体到热塑性塑料。共聚物的亲水性明显优于纯 PLA,有助于提高 PLA 基包装材料废弃后的降解速率。Li 等^[36]围绕聚乙二醇(PEG)和 PLA 共混体系探讨了 PEG 含量和分子量对 PLA 结晶行为和冲击韧性的影响,结果表明,PEG 的加入不仅能提高 PLA 的结晶度,而且增强了 PLA 链段的自由体积和运动能力,加快了与 PEG 之间的分子相互作用,改善了 PLA/PEG 共混物的结晶度和冲击强度。

2.2.4 PCL 基完全生物降解薄膜

聚己内酯(PCL)是通过 ϵ -己内酯单体在金属阴离子络合催化剂催化下开环聚合而成的高分子有

机聚合物^[37],又称聚 ϵ -己内酯,其化学式为 $(C_6H_{10}O_2)_n$ 。

聚己内酯是一种半结晶型聚合物,其结构重复单元上的非极性亚甲基和极性酯基,赋予了材料良好的柔韧性和加工性,具有形状记忆性^[9]、良好的生物相容性和良好的生物降解性等。由于聚己内酯的熔点较低、阻隔性能较差、成本较高,因而在一定程度上限制了其应用。为了推广 PCL,研究者对其开展了共聚改性、填充改性和复合改性,在降低其成本的同时,提高了 PCL 的屈服应力、拉伸强度、热性能和阻隔性能等。Gardella 等^[38]将马来酸酐接枝聚乳酸(PLA-g-MA)作为相容剂,对 PLA/PCL 不相容的共混物进行了改性,结果表明,通过共混反应将一部分 PCL 接枝到 PLA-g-MA 主链上,使功能化 PLA 和剩余非接枝 PCL 之间产生了更多的相互作用,有效改善了其两相相容性,有助于提升共混物的断裂伸长率。董同力嘎等^[39]利用茶多酚(TP)、壳聚糖(CS)、海藻糖和 TiO₂ 分别与 PCL 熔融共混,研究证实,TP、CS 和海藻糖结构上丰富的—OH 不利于非极性小分子的透过,可有效降低氧气透过系数,并改善 PCL 的阻氧性能,而 TiO₂ 与 PCL 共混则显著提升了其弹性模量,增强了共混薄膜的刚性。

2.2.5 明胶基完全生物降解薄膜

明胶(Gelatin)是一种大分子的亲水胶体,是动物结缔组织中的胶原部分水解而得到的某类蛋白质。虽然明胶具有与蛋白质大分子类似的特性,但明胶分子结构的特殊性也在一定程度上赋予了其独特的理化性质。明胶大分子中的螺旋结构不仅能提供其物理强度,并且主链上的羰基氧(C=O)和酰

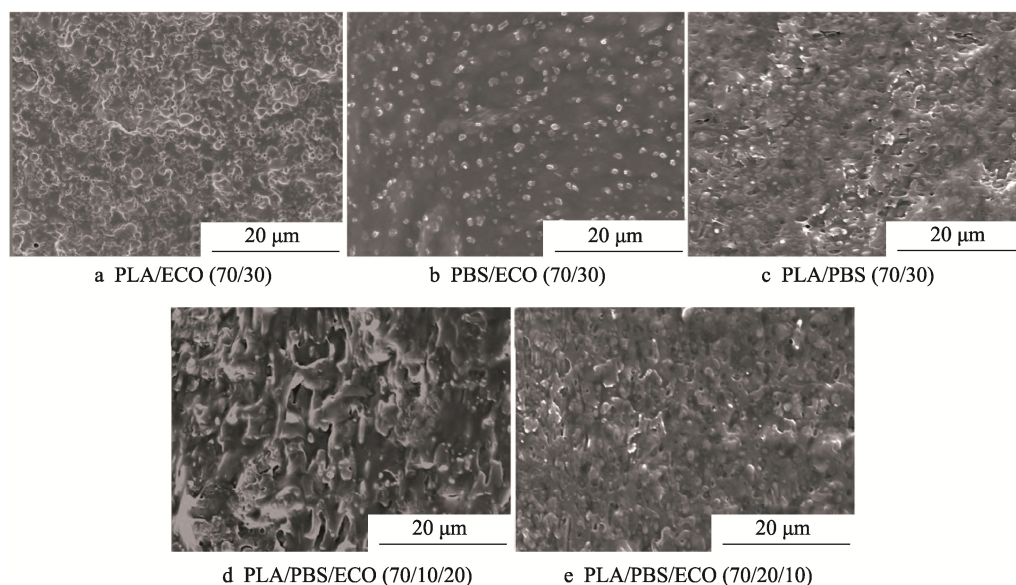


图 5 两元共混和三元共混的 SEM 照片 SEM^[34]
Fig.5 SEM images of binary blend and ternary blend^[34]

胺氢(—NH)会通过氢键与水形成稳定的网状结构,在完全干燥后成为玻璃态的明胶膜^[40]。无毒、凝胶性良好、相容性良好和生物降解性良好的明胶具有作为包装材料的巨大潜力,但其存在力学性能和耐热性较差等缺点^[41]。目前,学者们主要将明胶与其他天然高分子材料(如壳聚糖、甲壳素、纤维素等)共混,或采用物理交联、化学交联和酶促交联等手段对其进行改性。王海琪等^[41]在利用氧化壳聚糖对明胶进行复合改性的研究中发现,生物相容性良好、化学稳定性高的氧化壳聚糖的加入能有效提高明胶复合膜的耐热性和力学性能等。马晓英等^[42]选用四羟甲基氯化磷(THPC)作为交联剂对明胶进行了改性,研究表明,THPC可在明胶分子链之间形成共价交联网络,使交联改性后明胶薄膜的断裂应力得到显著提升,具有良好的透光率和生物降解性。

3 物流包装场景下可生物降解薄膜的性能与应用

3.1 可生物降解薄膜的生物降解性能

依据绿色物流包装的设计原则,在开发和选择面向绿色物流包装的可生物降解薄膜时,应综合考虑薄膜的包装适用性和环境友好性,重视包装的减量化、可回收再利用和绿色无害化等,以期实现环境共生型物流包装系统的构建。针对可生物降解薄膜的降

解性能评价方法和标准体系,国家相关部门颁布了多项标准文件。按照测试环境的不同,现在常用的降解性能评价方法有土埋法^[43-46]、堆肥法^[47-50]、特定酶降解法^[51-54]和活性污泥法等^[55-57],这些方法的实验操作、特点及应用见表 1。

3.2 不同物流场景下可生物降解薄膜的应用潜力

随着全球环保意识的提升,“限塑、禁塑”号角的吹响,面向绿色物流包装的可生物降解薄膜必将逐步替代石油基塑料包装膜,并成为物流包装材料领域的新宠。目前,以 PLA、PHA、PBAT、PCL、PBS 等聚酯类和淀粉基为主的可生物降解薄膜,也正在食品包装、商超包装、快递包装、卷烟分拣包装等物流场景中显现出巨大的应用潜力。

3.2.1 食品包装

在食品包装领域,包括 PLA 基薄膜、PBAT 共混膜、淀粉基薄膜和 PCL 薄膜等在内的多种可生物降解薄膜可作为可食性涂膜、内包装膜和一次性外包装膜,被广泛用于肉类、烘焙面包、果蔬生鲜和农副产品等食品的包装^[58-59]。其中,PLA 基薄膜具有质软、透明度高等特点,在烘焙面包^[8]、冷鲜肉^[58]、鲜切苹果^[60]等食物的包装方面得到了广泛应用。多项研究证实,PLA 薄膜不仅能有效抑制食品的呼吸作用,从而延长其货架期,而且还能被微生物降解,避免造成环

表 1 常用生物降解性能评价方法概况
Tab.1 Overview of common biodegradability evaluation methods

评价方法	实验操作	方法特点	应用
土埋法	将薄膜材料埋在土壤中进行降解试验,通过定期监测其质量和相关变化(表现形貌、边缘孔隙、内部结构和元素分布)评价其生物降解程度	易操作,能较好地反映薄膜在土壤环境中的降解情况;降解周期较长,试验重现性差	应用于 PLA 基 ^[43] 、淀粉基 ^[44] 、PBAT 基 ^[45] 和 PHBV ^[46] 等复合薄膜在土壤环境中生物降解行为的研究。该方法是一种简单易行的生物降解性能评价方法
堆肥法	通常依据相关国家标准文件开展试验,在受控堆肥条件下以 CO ₂ 的释放百分比来评价材料的生物降解性	降解速率快、准确性高;实验要求高,降解条件较严格,堆肥处理过程复杂	应用于淀粉基 ^[47] 、PBAT/PLA 共混 ^[48] 、PLA/PCL/MCC 复合 ^[49] 和 PHBV 基 ^[50] 等可生物降解薄膜在堆肥条件下生物降解特征的研究。该方法的降解周期短、重现性好,有助于揭示降解机理
特定酶降解法	将薄膜放在一定温度和 pH 值的特定酶溶液中,测定试验前后溶液中总碳量、CO ₂ 释放量或生化需氧量的变化情况,以评价其生物降解性	试验周期短,降解速率高;酶的筛选成本高,酶活性易受到环境条件的影响	用于测试薄膜在角质酶 ^[51] 、脂肪酶 ^[52] 、 α -淀粉酶和脂肪酶-N435 ^[54] 等中的降解性能。此方法是快速评价生物降解性能的有效手段
活性污泥法	在含有大量微生物、有机物和无机物的絮状泥粒中进行薄膜降解试验,实验中通过测定氧气的消耗速率来评价试样的降解性能	生物活性高,降解速率快;试验设备复杂,可操作性较差	用于天然纤维素纤维 ^[55] 、PLA、PHB 和 PCL 等多种可生物降解薄膜 ^[56] 在活性污泥中的生物降解性评价。该方法能较好地反映可生物降解材料在水性环境下的分解情况

境污染,是兼具包装功能和环境友好性的优良食品包装材料。此外,Varghese 等^[6]探究了 PHBV/纤维复合薄膜对草莓的保鲜效果,发现该薄膜不仅能延长草莓的保存时间,且其生物降解性也较好,适合作为延长易腐水果货架期的生态友好活性包装膜。Bumbudsanpharoke 等^[61]将 PBAT/PBS 生物基共混膜用于面包包装,证实该共混膜一方面能改善复合薄膜的形态和渗透性,另一方面还能抑制面包中真菌的生长,有效延长了面包的保存时间。成培芳等^[59]分析了 PCL 包装薄膜对菠菜贮藏品质的影响,发现 PCL 薄膜能延缓菠菜采摘后质量损失率的上升、丙二醛的积累,较好地维持了菠菜的感官品质。由此可见,品类繁多的可生物降解薄膜在食品包装领域的推广使用走在了绿色物流实际场景应用的前列,有助于推进和加快绿色低碳的物流包装薄膜的设计和应用。

3.2.2 商超包装

由可生物降解薄膜加工而成的连卷袋、保鲜袋、购物袋等主要用于全国大小型商超中的商品运输包装。以西安市为例,2021 年 1 月,三秦都市报相关记者经实地考察发现,位于碑林区李家村万达广场的沃尔玛超市、莲湖区西关购物广场的人人乐超市、雁塔南路的华润万家超市等均已完全推广使用以 PBAT 为主要成分的可生物降解包装袋。与传统塑料袋相比,可生物降解的环保袋的质感更软、手感更舒适,能较好地发挥其包装运输功能,但在盛装较重、较尖锐的物品时,仍存在易变形、易被刺穿破损等不足,这在一定程度上影响了可生物降解袋的推广应用。目前,学者们正在尝试通过不同方式开展复合包装薄膜的设计和制备,致力于可生物降解薄膜力学性能的进一步提升。陈玉华等^[62]利用纤维素纳米晶体(CNC)和槐糖脂(SL)掺杂 PLA,制备了 PLA/SL/CNC 复合包装膜,使改性复合膜的拉伸强度提高了 93.8%,韧性增加了 46%。Kim 等^[63]对聚丁二酸丁二醇(PBS)开展了改性研究,通过将碳酸二甲酯(DMC)、琥珀酸二甲酯(DMS)和 1,4-丁二醇(BD)进行共缩聚,再掺入柠檬酸作为交联剂和刚性粒子 CNC,大大提高了复合材料的拉伸强度、抗张强度和韧性。与一般的 PBS 薄膜相比,这种新型复合材料的断裂伸长率和撕裂韧性均更强,且兼具高生物降解性和低生物毒性。

3.2.3 快递包装

当前,快递包装领域的各大物流公司秉承“绿色化、减量化、可循环”的原则积极布局绿色包装材料的推广应用。据了解,已有相关企业试点将包装用的塑料薄膜、胶带、气囊等材料替换为以淀粉基、PLA、PBAT 为主的可降解材料^[16]。例如,全国物流行业绿色行动的标杆——菜鸟物流,已积极推行全降解塑料袋,研制了生物质绿色包装,为了实现

包装减量化,2020 年就取得了为 5.3 亿个包裹“瘦身”的成果。另外,京东、苏宁、邮政等也在加大对可降解、可循环等绿色包装材料的布局和投入^[64-65]。据了解,中国邮政在绿色包装工程的持续推进中,积极使用 PLA/PBAT 基可生物降解胶带,为加强塑料污染治理做出了表率。此外,国内外的部分企业也一直致力于快递物流包装可生物降解薄膜的研制。与我国有着市场活动 10 多年稳定增长的德国巴斯夫公司,于 2017 年用可生物降解的巴斯夫聚合物 ecoflex®和 PLA 制成了 ecovio®可生物降解快递袋^[66],这为我国快递行业的物流包装提供了一种优质的解决方案。我国武汉华丽生物股份有限公司和河南天仁生物材料研究有限公司分别生产出了以植物淀粉/纤维素和 PLA/PBAT 基为主要原料的可应用于快递包装行业的可生物降解膜(袋)。由此可见,在快递包装场景下可生物降解薄膜的应用是促进快递包装绿色转型的重要部分。

3.2.4 卷烟分拣包装

在卷烟物流场景中,可生物降解薄膜主要用于替代卷烟分拣后分组包装使用的 PE 热缩膜。据调查,卷烟行业在卷烟物流分拣包装环节使用的 PE 热缩膜的用量较大。虽然传统的 PE 热缩膜具有柔韧性强、抗撞击性强、收缩率大等优点,但其具有无法降解、在包装时的热缩过程耗能较大等缺点,使其无法满足物流包装材料绿色化转型的低碳设计要求,不符合我国低碳经济发展的必然趋势。目前,陕西省烟草公司西安市公司卷烟物流配送中心正在探索将 PBAT/PLA 复合的可生物降解薄膜引入卷烟商业配送环节的物流包装场景实际应用。初步研究证实,随着包装工艺的相应改进,将分拣后的物流包装替换为可生物降解薄膜,不但能满足卷烟分拣包装的力学要求,而且能减少包装物流工艺的能耗和环境污染。此外,相较于软塑周转箱、硬塑周转箱、布袋包装等绿色环保包装材料,可生物降解薄膜能够最大限度地利用卷烟商业配送环节的分拣包装设备,降低对卷烟物流作业模式(如卷烟分拣包装效率、送货交接效率、车辆装载率等)的影响,从而实现由传统 PE 包装到绿色薄膜包装的低碳转型,将可生物降解薄膜用于卷烟物流分拣包装过程是推进烟草行业绿色物流建设的重要探索。

3.2.5 其他

在当今倡导绿色环保的时代主题下,对面向绿色物流包装的可生物降解薄膜的需求量将逐步增大。除了上述几方面的应用外,未来可生物降解薄膜还可用于军品^[67]、体育器材^[68]和建筑材料^[69]等多个领域产品的生产线和物流运输包装。目前,我国可生物降解薄膜的研发工艺和生产技术水平尚不成熟,全面实现可生物降解薄膜在物流包装中的推广使用任重道远。

4 结语

国家对塑料污染治理力度的加大,以及“碳达峰、碳中和”政策的出台,已为可生物降解薄膜在绿色物流包装中的推广应用奠定了良好的政策基础,缔造了新的发展机遇。可生物降解薄膜的规模生产和推广应用将为我国现代物流体系高质量发展提供有力保障。目前,大量研究在通过共聚、共混、纳米粒子填充等手段提升可生物降解复合薄膜(如PBAT/PLA、壳聚糖/淀粉、TiO₂/PCL等)的力学性能、热性能、气体阻隔性能和刚性等方面取得了一定的进展。面向不同绿色物流场景的实际需求,运用绿色低碳的理念实现兼具优良力学性能和生物降解性的可生物降解薄膜的设计和制备,将是未来薄膜包装材料研究的重要内容。

参考文献:

- [1] KABIR E, KAUR R, LEE J, et al. Prospects of Biopolymer Technology as an Alternative Option for Non-Degradable Plastics and Sustainable Management of Plastic Wastes[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 258: 120536.
- [2] DE SOUSA F D B. The Role of Plastic Concerning the Sustainable Development Goals: The Literature Point of View[J]. *Cleaner and Responsible Consumption*, 2021, 3: 100020.
- [3] BAHL S, DOLMA J, JYOT S J, et al. Biodegradation of Plastics: A State of the Art Review[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 39: 31-34.
- [4] XIE Yuan-jian, PAN Yuan-feng, CAI Ping-xiong. Hydroxyl Crosslinking Reinforced Bagasse Cellulose/Polyvinyl Alcohol Composite Films as Biodegradable Packaging[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 176: 114381.
- [5] SUN Hong-xia, LI Jia-li. Behavioural Choice of Governments, Enterprises and Consumers on Recyclable Green Logistics Packaging[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, 28: 459-471.
- [6] VARGHESE S A, PULIKKALPARAMBIL H, RANGAPPA S M, et al. Novel Biodegradable Polymer Films Based on Poly(3-Hydroxybutyrate-Co-3-Hydroxyvalerate) and *Ceiba Pentandra* Natural Fibers for Packaging Applications[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020, 25: 100538.
- [7] LEE W, LEE J, CHUNG J W, et al. Enhancement of Tensile Toughness of Poly (Lactic Acid) (PLA) through Blending of a Polydecalactone-Grafted Cellulose Copolymer: The Effect of Mesophase Transition on Mechanical Properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 193: 1103-1113.
- [8] SUWANAMORN LERT P, KERDDONFAG N, SANE A, et al. Poly (Lactic Acid)/Poly (Butylene-Succinate-Co-Adipate) (PLA/PBSA) Blend Films Containing Thymol as Alternative to Synthetic Preservatives for Active Packaging of Bread[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020, 25: 100515.
- [9] SADEGHI A, RAZAVI S M A, SHAHRAMPOUR D. Fabrication and Characterization of Biodegradable Active Films with Modified Morphology Based on Polycaprolactone-Polylactic Acid-Green Tea Extract[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 205: 341-356.
- [10] SALEM A, JRIDI M, ABDELHEDI O, et al. Development and Characterization of Fish Gelatin-Based Biodegradable Film Enriched with *Lepidium Sativum* Extract as Active Packaging for Cheese Preservation[J]. *Heliyon*, 2021, 7(10): e08099.
- [11] SHANMATHY M, MOHANTA M, THIRUGNANAM A. Development of Biodegradable Bioplastic Films from Taro Starch Reinforced with Bentonite[J]. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2021, 2: 100173.
- [12] OUYANG Chao-ying, NIE Xiao-li. An Investigation into Green Logistics and Packaging Design[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 448: 4552-4556.
- [13] WANG Chun-fang, XU Ming, XU Yan-qiu. Research on Innovation and Application of Green Packaging Energy Saving Technology for E-Commerce Logistics[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 242: 052006.
- [14] 朱思翰. 我国绿色物流包装产业发展的对策与趋势[J]. *物流技术与应用*, 2018, 23(12): 166-169.
ZHU Si-han. Countermeasure and Trend of Green Logistics Packaging Industry Development in China[J]. *Logistics & Material Handling*, 2018, 23(12): 166-169.
- [15] 任芳. 10亿包裹时代看物流技术全面升级[J]. *物流技术与应用*, 2018, 23(12): 98-101.
REN Fang. Logistics Technology Upgrading in the Age of 1 Billion Packages[J]. *Logistics & Material Handling*, 2018, 23(12): 98-101.
- [16] MOSHOOD T D, NAWANIR G, MAHMUD F, et al. Sustainability of Biodegradable Plastics: New Problem or Solution to Solve the Global Plastic Pollution?[J]. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 2022, 5: 100273.
- [17] GARCÍA-DEPRAECT O, BORDEL S, LEBRERO R, et al. Inspired by Nature: Microbial Production, Degradation and Valorization of Biodegradable Bioplastics for Life-Cycle-Engineered Products[J]. *Biotechnology Ad-*

- vances, 2021, 53: 107772.
- [18] MOSHOOD T D, NAWANIR G, MAHMUD F, et al. Biodegradable Plastic Applications towards Sustainability: A Recent Innovations in the Green Product[J]. Cleaner Engineering and Technology, 2022, 6: 100404.
- [19] 崔文娟. 可降解塑料的种类及应用现状[J]. 杨凌职业技术学院学报, 2021, 20(2): 20-22.
- CUI Wen-juan. Types and Application Status of Degradable Plastics[J]. Journal of Yangling Vocational & Technical College, 2021, 20(2): 20-22.
- [20] SHRIVASTAVA A, DONDAPATI S. Biodegradable Composites Based on Biopolymers and Natural Bast Fibres: A Review[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 1420-1428.
- [21] MANGARAJ S, MOHANTY S, SWAIN S, et al. Development and Characterization of Commercial Biodegradable Film from PLA and Corn Starch for Fresh Produce Packaging[J]. Journal of Packaging Technology and Research, 2019, 3(2): 127-140.
- [22] 郭安福, 唐娟, 徐婕, 等. 基于全生命周期理论的生物基包装材料环境友好性模型与评价[J]. 化工新型材料, 2017, 45(7): 138-140.
- GUO An-fu, TANG Juan, XU Jie, et al. Model and Assessment of Environmental Property of Biomass Packaging Material Based on LCA[J]. New Chemical Materials, 2017, 45(7): 138-140.
- [23] LIU Hong, KUMAR V, JIA Lin-jing, et al. Biopolymer Poly-Hydroxyalkanoates (PHA) Production from Apple Industrial Waste Residues: A Review[J]. Chemosphere, 2021, 284: 131427.
- [24] KUMAR V, SEHGAL R, GUPTA R. Blends and Composites of Polyhydroxyalkanoates (PHAs) and Their Applications[J]. European Polymer Journal, 2021, 161: 110824.
- [25] SHARMA V, SEHGAL R, GUPTA R. Polyhydroxyalkanoate (PHA): Properties and Modifications[J]. Polymer, 2021, 212: 123161.
- [26] DUANGPHET S, SZEGDA D, TARVERDI K, et al. The Effect of Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) on Crystallization Behavior and Morphology of Poly(3-Hydroxybutyrate-Co-3-Hydroxyvalerate)[J]. Key Engineering Materials, 2019, 798: 343-350.
- [27] DON T M, CHUNG C Y, LAI S M, et al. Preparation and Properties of Blends from Poly(3-Hydroxybutyrate) with Poly (Vinyl Acetate)-Modified Starch[J]. Polymer Engineering & Science, 2010, 50(4): 709-718.
- [28] TANG Jun, ZOU Fei-xue, GUO Li, et al. The Relationship between Linear Chain Length Distributions of Amylopectin and the Functional Properties of the Degradable Starch-Based Films[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 279: 119012.
- [29] AGARWAL S. Major Factors Affecting the Characteristics of Starch Based Biopolymer Films[J]. European Polymer Journal, 2021, 160: 110788.
- [30] 刘文勇, 王志杰, 刘家豪, 等. 淀粉薄膜的研究进展[J]. 包装学报, 2020, 12(1): 25-35.
- LIU Wen-yong, WANG Zhi-jie, LIU Jia-hao, et al. Research Progress on Starch Films[J]. Packaging Journal, 2020, 12(1): 25-35.
- [31] IVANIČ F, JOČEC-MOŠKOVÁ D, JANIGOVÁ I, et al. Physical Properties of Starch Plasticized by a Mixture of Plasticizers[J]. European Polymer Journal, 2017, 93: 843-849.
- [32] DANG K M, YOKSAN R. Morphological Characteristics and Barrier Properties of Thermoplastic Starch/Chitosan Blown Film[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 150: 40-47.
- [33] NIU Wei-dong, GUO Yun-feng, HUANG Wei, et al. Aliphatic Chains Grafted Cellulose Nanocrystals with Core-Corona Structures for Efficient Toughening of PLA Composites[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 285: 119200.
- [34] 胡宽, 江海, 黄冬, 等. 聚丁二酸丁二醇酯与氯醚弹性体协同增韧改性聚乳酸多元共混体系[J]. 应用化学, 2019, 36(9): 996-1002.
- HU Kuan, JIANG Hai, HUANG Dong, et al. Synergetic Modification of Polybutylene Succinate and Poly (Epichlorohydrin-Co-Ethylene Oxide) Elastomer in Toughening Poly (Lactic Acid)[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2019, 36(9): 996-1002.
- [35] CASTILLEJOS S, CERNA J, MELÉNDEZ F, et al. Bulk Modification of Poly (Lactide) (PLA) via Copolymerization with Poly (Propylene Glycol) Diglycidylether (PPGDGE)[J]. Polymers, 2018, 10(11): 1184.
- [36] LI Feng-jiao, ZHANG Shui-dong, LIANG Ji-zhao, et al. Effect of Polyethylene Glycol on the Crystallization and Impact Properties of Polylactide-Based Blends[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2015, 26(5): 465-475.
- [37] KHORRAMNEZHAD M, AKBARI B, AKBARI M, et al. Effect of Surface Modification on Physical and Cellular Properties of PCL Thin Film[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2021, 200: 111582.
- [38] GARDELLA L, CALABRESE M, MONTICELLI O. PLA Maleation: An Easy and Effective Method to Modify the Properties of PLA/PCL Immiscible Blends[J]. Colloid and Polymer Science, 2014, 292(9): 2391-2398.
- [39] 董同力嘎, 赵淑环, 张晓燕, 等. PCL 抑菌包装膜的制

- 备及其性能研究[J]. 化工新型材料, 2015, 43(10): 48-50.
- DONG Tungalag, ZHAO Shu-huan, ZHANG Xiao-yan, et al. Preparation and Characterization of PCL Antibacterial Packaging Film[J]. New Chemical Materials, 2015, 43(10): 48-50.
- [40] LUO Qing-ying, HOSSEN M A, ZENG Yuan-bo, et al. Gelatin-Based Composite Films and Their Application in Food Packaging: A Review[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 313: 110762.
- [41] 王海琪, 曾丽静, 邹丽玲, 等. 明胶-氧化壳聚糖复合膜的制备及优化[J]. 长春师范大学学报, 2021, 40(10): 72-77.
- WANG Hai-qi, ZENG Li-jing, ZOU Li-ling, et al. Preparation and Optimization of Gelatin Oxidized Chitosan Composite Film[J]. Journal of Changchun Normal University, 2021, 40(10): 72-77.
- [42] 马晓英, 韩建林, 陈学军, 等. 四羟甲基氯化磷交联废弃皮明胶制备可生物降解薄膜[J]. 皮革科学与工程, 2021, 31(5): 12-19.
- MA Xiao-ying, HAN Jian-lin, CHEN Xue-jun, et al. Biodegradable Film Fabricated Using Waste Leather Gelatin Cross-Linked by Tetrakis Hydroxymethyl Phosphonium Chloride[J]. Leather Science and Engineering, 2021, 31(5): 12-19.
- [43] MARTUCCI J F, RUSECKAITE R A. Biodegradation Behavior of Three-Layer Sheets Based on Gelatin and Poly(Lactic Acid) Buried under Indoor Soil Conditions[J]. Polymer Degradation and Stability, 2015, 116: 36-44.
- [44] SHARMA S, MAJUMDAR A, BUTOLA B S. Tailoring the Biodegradability of Polylactic Acid (PLA) Based Films and Ramie-PLA Green Composites by Using Selective Additives[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 181: 1092-1103.
- [45] 杨菁卉, 杨福馨, 李绍菁, 等. PBAT/淀粉填充可降解薄膜的制备及降解性能的研究[J]. 功能材料, 2020, 51(10): 10075-10080.
- YANG Jing-hui, YANG Fu-xin, LI Shao-jing, et al. Preparation and Degradability of PBAT/Starch Filled Degradable Films[J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51(10): 10075-10080.
- [46] ARCOS-HERNANDEZ M V, LAYCOCK B, PRATT S, et al. Biodegradation in a Soil Environment of Activated Sludge Derived Polyhydroxyalkanoate (PHBV)[J]. Polymer Degradation and Stability, 2012, 97(11): 2301-2312.
- [47] 张欣, 王文涛, 侯汉学. 淀粉复合膜的堆肥降解性能研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(23): 7899-7906.
- ZHANG Xin, WANG Wen-tao, HOU Han-xue. Composting Degradation Behavior of Starch Composite Film[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(23): 7899-7906.
- [48] 张敏, 孟庆阳, 刁晓倩, 等. PLA/PBAT 共混物的降解性能研究[J]. 中国塑料, 2016, 30(8): 79-86.
- ZHANG Min, MENG Qing-yang, DIAO Xiao-qian, et al. Biodegradation Behavior of PLA/PBAT Blends[J]. China Plastics, 2016, 30(8): 79-86.
- [49] KALITA N K, BHASNEY S M, MUDENUR C, et al. End-of-Life Evaluation and Biodegradation of Poly (Lactic Acid) (PLA)/Polycaprolactone (PCL)/ Microcrystalline Cellulose (MCC) Polyblends under Composting Conditions[J]. Chemosphere, 2020, 247: 125875.
- [50] MUNIYASAMY S, OFOSU O, THULASINATHAN B, et al. Thermal-Chemical and Biodegradation Behaviour of Alginic Acid Treated Flax Fibres/ Poly (Hydroxybutyrate-Co-Valerate) PHBV Green Composites in Compost Medium[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2019, 22: 101394.
- [51] 于冶杭, 赵子玉, 苏婷婷, 等. 聚己内酯/聚乳酸共混物角质酶降解性能[J]. 塑料, 2020, 49(5): 112-115.
- YU Ye-hang, ZHAO Zi-yu, SU Ting-ting, et al. Degradation Properties of Poly(ϵ -Caprolactone)/Polylactic Acid Blends by Cutinase[J]. Plastics, 2020, 49(5): 112-115.
- [52] LI Cheng-tao, ZHANG Min, WENG Yun-xuan, et al. Effect of Organic Solvent on Enzymatic Degradation of Cyclic PBS-Based Polymers by Lipase N₄₃₅[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 137: 215-223.
- [53] CHO J Y, PARK S L, LEE Hong-ju, et al. Polyhydroxyalkanoates (PHAs) Degradation by the Newly Isolated Marine *Bacillus* Sp JY14[J]. Chemosphere, 2021, 283: 131172.
- [54] 苗妮娜, 张敏, 张璐, 等. 不同酶对 PBS 基共聚酯/淀粉复合材料降解性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(3): 84-89.
- MIAO Ni-na, ZHANG Min, ZHANG Lu, et al. Effects of Different Enzymes on Degradation of PBS-Based Copolymer/Starch Composite[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(3): 84-89.
- [55] 唐莹莹, 陈华君, 潘志娟. 纤维素纤维在活性污泥中的生物降解性能[J]. 纺织学报, 2010, 31(9): 5-10.
- TANG Ying-ying, CHEN Hua-jun, PAN Zhi-juan. Biodegradability of Cellulose Fibers in Activated Sludge[J]. Journal of Textile Research, 2010, 31(9): 5-10.

- [56] SWIONTEK BRZEZINSKA M, WALCZAK M, KALWASIŃSKA A, et al. Biofilm Formation during Biodegradation of Polylactide, Poly (3, 4 Hydroxybutyrate) and Poly(ϵ -Caprolactone) in Activated Sludge[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 159: 539-546.
- [57] GARCÍA-DEPRAECT O, LEBRERO R, RODRIGUEZ-VEGA S, et al. Biodegradation of Bioplastics under Aerobic and Anaerobic Aqueous Conditions: Kinetics, Carbon Fate and Particle Size Effect[J]. Bioresource Technology, 2022, 344: 126265.
- [58] 赵子龙, 王羽, 云雪艳, 等. 高阻隔性 PLLA 薄膜的制备及其对冷鲜肉保鲜效果的研究[J]. 食品科技, 2015, 40(11): 89-95.
- ZHAO Zi-long, WANG Yu, YUN Xue-yan, et al. Preparation of High Barrier PLLA Membrane and Its Effect on Preservation of Chilled Meat[J]. Food Science and Technology, 2015, 40(11): 89-95.
- [59] 成培芳, 董同力嘎, 春艳, 等. 聚己内酯自发气调包装薄膜对菠菜贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(2): 133-137.
- CHENG Pei-fang, DONG Tungalag, CHUN Yan, et al. Effect of Poly(ϵ -Caprolactone) Modified Atmosphere Packaging Film on Postharvest Quality of Spinach[J]. Food & Machinery, 2018, 34(2): 133-137.
- [60] LI Wen-hui, LI Lin, CAO Yun, et al. Effects of PLA Film Incorporated with ZnO Nanoparticle on the Quality Attributes of Fresh-Cut Apple[J]. Nanomaterials, 2017, 7(8): 207.
- [61] BUMBUDSANPHAROK N, WONGPHAN P, PROMHUAD K, et al. Morphology and Permeability of Bio- Based Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate) (PBAT), Poly (Butylene Succinate) (PBS) and Linear Low-Density Polyethylene (LLDPE) Blend Films Control Shelf-Life of Packaged Bread[J]. Food Control, 2022, 132: 108541.
- [62] 陈玉华, 乔金莲, 许乐. 聚乳酸基纤维素纳米晶体抗菌包装材料的制备及其性能研究[J]. 塑料科技, 2022, 50(1): 74-77.
- CHEN Yu-hua, QIAO Jin-lian, XU Le. Preparation and Properties of Polylactic Acid Based Cellulose Nanocrystals Antibacterial Packaging Materials[J]. Plastics Science and Technology, 2022, 50(1): 74-77.
- [63] KIM H, JEON H, SHIN G, et al. Biodegradable Nanocomposite of Poly(Ester-co-Carbonate) and Cellulose Nanocrystals for Tough Tear-Resistant Disposable Bags[J]. Green Chemistry, 2021, 23(6): 2293-2299.
- [64] 刘欣. 走好快递包裹绿色路[J]. 今日中国, 2019, 68(9): 56-58.
- LIU Xin. Take the Express Parcel Green Road[J]. China Today, 2019, 68(9): 56-58.
- [65] 徐世豪, 徐海萍, 王静荣, 等. 可降解高分子材料研究进展及在快递绿色包装领域的应用[J]. 合成材料老化与应用, 2020, 49(3): 117-120.
- XU Shi-hao, XU Hai-ping, WANG Jing-rong, et al. Research Progress of Degradable Polymer Materials and Their Application in Express Green Packaging[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2020, 49(3): 117-120.
- [66] 佚名. 巴斯夫推出新型可生物降解快递包装袋[J]. 塑料科技, 2017, 45(5): 40.
- Anon. BASF Launches New Biodegradable Express Packaging Bag[J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(5): 40.
- [67] 赵吉敏, 孙剑桥, 刘振华. 新时代军品包装的发展方向[J]. 包装工程, 2021, 42(7): 270-274.
- ZHAO Ji-min, SUN Jian-qiao, LIU Zhen-hua. Development Direction of Military Packaging in the New Era[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(7): 270-274.
- [68] 张超勇, 史明政, 苗建廷. 绿色包装理念在体育器材中的应用研究[J]. 湖南包装, 2020, 35(4): 37-40.
- ZHANG Chao-yong, SHI Ming-zheng, MIAO Jian-ting. Research on Application of Green Packaging Concept in Sports Equipment[J]. Hunan Packaging, 2020, 35(4): 37-40.
- [69] 黄建国, 黄充. 展望可降解塑料与建材包装材料[J]. 上海包装, 2019(8): 18-20.
- HUANG Jian-guo, HUANG Chong. Prospect of Degradable Plastics and Building Materials Packaging Materials[J]. Shanghai Packaging, 2019(8): 18-20.

责任编辑: 彭颀