

可生物降解塑料的应用现状、问题及对策

蔡凯, 冯杰*

(浙江工业大学材料科学与工程学院, 浙江杭州 310014)

摘要: 随着全球塑料白色污染问题日益严峻, 可生物降解塑料作为解决塑料白色污染的重要手段之一, 近年来受到广泛关注。文章系统综述了可生物降解塑料的定义、降解机理、分类、应用现状、存在的问题以及发展方向, 并针对我国2020年以来的“禁限塑”政策执行现状, 提出了塑料降解仍需分级管理以及全生命周期评价等政策建议, 旨在为我国塑料白色污染的治理提供参考。

关键词: 可生物降解塑料; 降解机理; 改性; 应用; 发展方向

中图分类号: TQ322.4

文献标识码: A

文章编号: 1006-334X(2025)04-0001-07

塑料因其优良的性能和低廉的成本, 已成为现代社会不可或缺的材料。然而, 传统塑料的难降解或不可降解性导致白色污染问题日益严重。据统计, 2022年全球废塑料总产量达到了2.6768亿吨, 但仅回收了3796万吨(占原生生产的9%), 填埋1.031亿吨, 焚烧8999万吨, 由于管理不当遗弃在自然环境中2960万吨, 预计2025年全球塑料产量将达到5.16亿吨, 废旧塑料产生量将超过4亿吨, 对生态系统和人类健康构成威胁^[1]。在此背景下, 可生物降解塑料作为一种环境友好型材料, 被视为解决塑料白色污染问题的有效途径之一。

随着塑料污染治理需求的增加, 全球各国纷纷出台“禁限塑”政策, 推动了可生物降解塑料的研发与应用^[2]。近年来, 可生物降解塑料在材料设计、降解机理、应用拓展以及改性研究等方面取得了显著进展, 但行业发展整体上并不乐观。本文旨在梳理不同可生物降解塑料的优缺点、应用现状、行业亟需解决的难题等, 探讨相应的解决方案, 同时也提出了建议, 为政府相关政策制定提供参考。

1 可生物降解塑料的定义、降解机理

根据国家标准 GB/T 35795—2017《全生物降解农用地面覆盖薄膜》和 GB/T 41010—2021《生物降解塑料与制品降解性能及标识要求》的定义^[3-4], 生物降解材料是指在自然界如土壤和/或沙土等条件下, 和/或特定条件如堆肥化条件下或厌氧消化条件下或水性培养液中, 由自然界存在的微生物作用引起降解, 并最终完全降解变成二氧化碳(CO₂)或/和

甲烷(CH₄)、水(H₂O)及其所含元素的矿化无机盐以及新的生物质的材料。标准明确要求, 生物降解塑料的相对生物降解率应大于或等于90%, 且材料中组分大于或等于1%的单一有机成分绝对生物降解率应大于或等于60%。

可生物降解塑料的降解过程主要分为两个阶段: 首先是水解阶段, 塑料在水分作用下发生化学键断裂, 分子量降低; 随后是微生物代谢阶段, 低分子量(约1000~5000 g/mol)片段被微生物摄入体内, 通过代谢作用转化为二氧化碳、水和生物质^[5-6]。这一机制得到了同位素示踪研究的证实^[7-8]。

2 可生物降解塑料的分类

根据原料来源与合成路径, 可生物降解塑料可分为天然高分子基、微生物合成和化学合成三大类, 其分子结构、性能特点与改性策略各有侧重。

2.1 天然高分子基

天然高分子基塑料直接或间接来源于生物质, 主要包括淀粉、纤维素、甲壳素、海藻酸盐、蛋白质等。具有原料可再生、生物相容性高及可完全降解等优点, 但其固有的强亲水性和较差的力

引用格式: 蔡凯, 冯杰. 可生物降解塑料的应用现状、问题及对策[J]. 合成技术及应用, 2025, 40(4): 1-7.

Citation: CAI K, FENG J. Application status, problems and countermeasures of biodegradable plastics[J]. Synthetic Technology and Application, 2025, 40(4): 1-7.

收稿日期: 2025-11-19

作者简介: 蔡凯(1998—), 浙江绍兴人, 在读博士研究生, 主要研究方向为可生物降解塑料的合成与改性。

* **通信作者:** 冯杰, fengjie@zjut.edu.cn.

学性能制约了其广泛应用。需通过化学改性,减少氢键,增加疏水性和热塑性,才能加工成用于外包装的膜袋。

全淀粉基塑料:以天然淀粉(如玉米、马铃薯、木薯淀粉等)为原料,通过添加水、甘油、山梨糖醇等增塑剂,破坏淀粉大分子的氢键和结晶结构,使其具备热塑性。未改性的淀粉基塑料脆性大、耐水性极差。当前研究主要通过酯化、醚化或接枝共聚等方式引入疏水基团,降低其吸水性,提高塑性及尺寸稳定性^[9];另外,通过添加纳米纤维素(CNC)、蒙脱土(MMT)等纳米填料,形成纳米复合材料,显著提升其力学强度和热稳定性^[10]。

纤维素/甲壳素基塑料:纤维素和甲壳素是自然界储量最丰富的天然高分子材料,但其难以熔融加工。改性研究集中于加工方法以及衍生物利用,例如采用离子液体等新型绿色溶剂溶解纤维素,然后通过再生工艺制备薄膜(如包装高粱饴的薄膜)和人造丝,或者将其转化为热塑性衍生物,如醋酸纤维素、羟丙基甲基纤维素等,再进行加工^[11]。整体上看,这类高分子材料热塑性差,价格贵,且不耐水,无论性能还是成本,均难以与聚乙烯(PE)等难降解高分子材料竞争。

海藻酸盐基塑料:海藻酸盐是一种源自海洋褐藻的天然阴离子多糖。海藻酸盐基塑料无毒、无刺激性,且具有良好的生物相容性和吸湿性,被广泛应用于药物控释制剂的开发。然而,其大规模推广仍面临两大关键障碍:一是成本问题,海藻酸盐基塑料的生产成本普遍高于传统塑料;二是性能短板,尤其在机械强度、耐水性和加工性能方面,与传统塑料相比仍有显著差距^[12]。

蛋白质基塑料:蛋白质基塑料具有来源广泛、绿

色环保、生物相容性好和易生物降解的独特优势,成为新型生物基塑料的重要原料。蛋白质来源于植物和动物可再生资源,其降解产物对环境无害,符合循环经济理念。但与传统石油基塑料相比,蛋白质基塑料在力学强度、耐水性和耐久性方面仍有差距,特别是在高湿环境下的性能稳定性不足,且蛋白质的热敏性导致加工窗口较窄,在热加工过程中容易出现降解和焦化现象,限制了加工方式的选择。改性和加工成本使得蛋白质基塑料的总体成本高于传统塑料,缺乏市场竞争力^[13]。

2.2 微生物合成

微生物合成材料是由微生物在特定营养条件下于体内合成并积累,主要为聚羟基脂肪酸酯(PHA),其中聚羟基丁酸酯(PHB)最为常见^[14]。PHB具有100%的生物基含量和在多种自然环境下(包括土壤、海洋)的完全降解能力,且降解产物对环境无害^[15]。但其缺点同样突出:生产成本高昂(约7.5万元/吨)、加工窗口窄(熔点为170~180℃,分解温度为180~200℃)、均聚物较脆且热稳定性差^[16]。2025年4月,珠海安宇生物科技宣布全球首款PHA水性涂层纸杯研发成功,完美解决了无氟、降解以及高效回收的难题。

2.3 化学合成

化学合成材料是通过单体聚合而成,其大分子链结构可设计性强,力学性能和表面疏水性更接近传统塑料,是目前市场应用的主流材料。主要是含有脂肪族二元酸的聚酯,包括聚己二酸/对苯二甲酸-丁二醇酯(PBAT)、聚丁二酸丁二醇酯(PBS)、聚碳酸亚丙酯(PPC)、聚乳酸(PLA)、聚羟基乙酸(PGA)等,其关键物性如表1所示^[17]。目前,实际应用中的制品主要以PLA和PBAT为主。

表1 常见化学合成的可生物降解塑料品种及物性

项目	PBAT	PBS	PPC	PLA	PGA
密度/(g·cm ⁻³)	1.20~1.26	1.24~1.26	1.25~1.30	1.21~1.25	1.50~1.71
玻璃化转变温度/℃	-30~-25	-45~-32	25~40	55~65	35~45
耐热变形温度/℃	50~65	85~97	~45	55~60	>100
拉伸强度/MPa	20~35	30~40	20~40	50~70	90~110
断裂伸长率/%	500~800	200~500	10~30	4~10	3~5
缺口冲击强度/(kJ·m ⁻²)	不断	3.0~6.0	2.0~5.0	2.0~3.0	0.7~1.0
工业堆肥下降解速率	中等	较快	快	慢	极快

3 可生物降解塑料的应用

可生物降解塑料凭借其环境友好性,已在多个关键领域实现规模化应用,并展现出广阔的发展

前景。

在包装领域,可生物降解塑料是替代传统塑料制品的生力军,广泛应用于超市购物袋、食品包装膜、生鲜托盘及一次性餐具(如刀叉、吸管、咖啡胶

囊)等。这类制品在使用后可在特定条件下实现完全降解,极大缓解了“白色污染”压力,例如 PLA 基透明食品容器和 PBAT 基生物降解塑料袋已进入日常消费市场^[18]。

在农业领域,可生物降解地膜是解决农田残膜污染问题的核心方案,可以在作物生长周期结束后于土壤中自然分解,避免对土壤结构和微生物环境造成长期损害;此外,育苗钵、农药缓释载体等农用制品也正逐步采用可生物降解材料,共同推动农业的可持续发展。

在生物医疗领域,PLA、PGA 等材料因具备良好

的生物相容性和可控降解性,被用于制造手术缝合线、组织工程支架、药物缓释微球及可吸收骨固定器件,这些材料在完成治疗功能后可在体内降解并被吸收,无需二次手术取出,显著提升患者康复质量^[19]。

此外,在纺织纤维(如可降解无纺布、服装衬里)、日用消费品(如酒店一次性可降解洗漱用品、可堆肥垃圾袋)及 3D 打印等新兴领域,可生物降解塑料的创新应用也在持续拓展,共同构建了绿色低碳的循环经济体系。目前可生物降解塑料主要在以下部分领域获得了成功应用,具体产品及关键配方如表 2 所示。

表 2 常见可生物降解塑料部分产品及关键配方

序号	产品	关键配方
1	购物袋	PBAT+少量 PLA+碳酸钙/滑石粉或热塑性淀粉
2	地膜	PBAT+少量 PLA+PPC(阻水)+UV 助剂+抗水解剂
3	快递袋	PBAT+少量 PLA+碳酸钙/滑石粉或热塑性淀粉
4	胶带基膜	增韧或强韧平衡改性的 PLA,双拉或单拉,透明款靠增塑实现
5	吸管	PLA+PBS+PBAT+滑石粉,防止助剂(偶联剂、抗氧化剂、润滑剂)析出
6	餐盒	PLA+PBS+PBAT+滑石粉,防止助剂(偶联剂、抗氧化剂、润滑剂)析出
7	发泡减震块	热塑性淀粉(水发泡)或 PBAT(化学或 CO ₂ 超临界发泡)
8	保鲜膜	PBAT+PPC 或 PBAT+少量 PGA,防止助剂(偶联剂、抗氧化剂、润滑剂)析出
9	热收缩膜	增韧或强韧平衡改性的 PLA,透明款靠增塑实现
10	纸张淋膜	PLA 或 PBAT(熔体黏度低),添加热氧老化助剂

4 可生物降解塑料的改性

4.1 PLA 改性

PLA 是由淀粉糖化发酵得到乳酸,再经缩聚或成环/开环聚合制得。PLA 具有高强度、高模量、高透明度等优点,但左旋 PLA(PLLA)存在脆性大、热变形温度低、降解速率慢的缺陷,因此 PLA 的改性主要以增韧改性为主。在聚合时引入少量 D-乳酸,得到的 PDLA 韧性明显改善,但结晶性能、拉伸强度和耐热性能均会下降^[20]。PLLA 与柔性/弹性聚合物共混是最主要的增韧手段。在早期的研究中,柔性聚合物通常是不可生物降解的聚合物,如 PE^[21]、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)^[22]、聚氨酯(PU)^[23]、乙烯-甲基丙烯酸缩水甘油酯共聚物(EGMA)^[24]等。这些不可生物降解的材料在一定程度上损害了复合材料的可降解性。因此,学术界开始关注使用可生物降解材料来增韧 PLA,如 PBAT、木质素等^[25]。

在 PLA 和聚合物的共混中,简单共混会导致 PLA 拉伸强度与模量明显下降^[26]。但通过添加

相容剂可改善两相的相容性,明显提升 PLA 韧性。Qu 等^[27]采用动态硫化技术,以过氧化物为交联剂,对增韧相乙烯-丙烯酸酯-甲基丙烯酸缩水甘油酯三元共聚物进行微交联,同时在界面处产生共交联,明显提升了 PLLA 韧性。进一步,在增韧相 EGMA^[28]或 PBAT^[29]中预先混入少量 PLA 等硬相,再通过动态硫化将增韧相分散到 PLA 中,实现了 PLA 的强韧平衡改性。

Cai 等^[30]以 PBAT 为增韧剂,采用平行双螺杆挤出机实现了 PLA/PBAT 的动态硫化工艺,即将双叔丁基过氧异丙基苯(BIBP)和三烯丙基异氰脲酸酯(TAIC)交联体系先分散到 PBAT 中,然后再与 PLA 进行熔融共混。BIBP 和 TAIC 在剪切分散过程中可以引发 PBAT 微交联反应,从而增强 PBAT 的强度。同时在 PLA/PBAT 界面处将二者共交联,提高了界面相容性。当 BIBP 和 TAIC 质量分数分别为 PBAT 的 0.1% 和 0.3% 时,PLA/PBAT(7/3)的缺口冲击强度和断裂伸长率分别达到 42.3 kJ/m² 和 264.3%,远高于未交联的复合材料(9.4 kJ/m² 和 21.3%)。复合材料的拉伸强度(46.2 MPa)和拉伸模

量(1 676.8 MPa)均优于未交联复合材料。

在上述研究的基础上,Cai等^[31]以硅烷偶联剂KH560改性的超细CaCO₃为无机填料,以含多环氧侧基的低聚物(ADR)为PLA/PBAT的增容剂,通过双螺杆挤出机采用两步熔融法制备了具有“ABS”结构的PLA/PBAT/CaCO₃复合材料。在4% ADR和20% CaCO₃添加量下,复合材料热压样品的缺口冲击强度和拉伸强度分别达到74.5 kJ/m²和55.7 MPa,分别是PLA/PBAT简单共混物的11倍和1.3倍。但其注塑样品的缺口冲击强度却提升有限,这是因为实验时使用了小型平行双螺杆挤出机,物料在动态硫化时滞留时间短,PBAT并未在剪切分散后实现交联。因此,在动态硫化时引入了催化剂,促使分散相在剪切分散后完成交联,所得注塑样品缺口冲击强度也明显提高,同样引入碳酸钙后,获得了强韧平衡的PLA^[32]。

4.2 PBAT改性

PBAT大分子链兼具柔性的脂肪链段和刚性的芳香链段,因此拥有类似低密度聚乙烯(LDPE)的优异柔韧性和强度。但相对PE尤其是再生PE,其生产成本较高,耐穿刺性差,对水汽阻隔性较差,耐候性不佳,这些都限制了PBAT薄膜尤其是作为农膜的应用^[33]。为了扩大PBAT的应用范围,研究者们开发了多种改性策略,主要通过添加关键助剂,甚至改变合成单体来优化其上述性能,解决行业痛点问题。同时通过引入低成本填料或其他聚合物共混来降低材料成本^[34]。

淀粉作为一种来源广泛、价格低廉且可完全生物降解的天然高分子材料,是PBAT改性的理想填料。研究表明,将淀粉加入PBAT中,可大幅降低PBAT膜袋的成本,并加速PBAT的降解。但亲水的淀粉和疏水的PBAT相容性差,在填充时需要解决两者相容性差的问题^[35]。Bai等^[36]研究了反应性环氧增容剂(REC)和制备方法对PBAT/热塑性淀粉(TPS)共混物形貌和性能的影响,实验发现REC加入有效地改善了PBAT/TPS共混物的相容性,在TPS填充质量分数为50%时复合薄膜仍具有良好的力学性能,且显著降低了复合薄膜生产成本。但TPS本身的强度低于PBAT,如果能提高TPS本身的强度有望进一步提高复合薄膜的拉伸强度。

Cai等^[37]采用平行双螺杆挤出机和动态硫化工艺,将BIBP/TAIC交联体系在非高温下预先分散到热塑性淀粉TPS中,然后再与PBAT在较高温度下进行熔融共混。在第二步挤出造粒工艺中,BIBP和

TAIC在剪切分散TPS过程中可以使其微交联,从而增强其强度。同时在PBAT/TPS界面处将二者共交联,提高了界面相容性和结合力。将所得共混物颗粒吹膜并测试力学性能,发现当TPS质量分数为30%、TAIC质量分数为TPS的2%时,复合材料薄膜的拉伸强度为25.4 MPa,断裂伸长率为580.8%,即共混物同时具有良好的加工性能和生物降解性能。

为提高PBAT农用地膜的保水保墒性能,通常添加PPC^[38]。另外,在PBAT中添加二维纳米材料,如有机黏土^[39],也能提高PBAT薄膜的保水保墒性能。Zhou等^[40]发现在添加木质素/蒙脱土质量分数为60%时,PBAT复合薄膜显示出优异的气体阻隔能力,其水蒸气渗透率和氧气渗透率分别降低了40%和90%。PGA具有优异的阻水性能,将其混入PBAT并吹成薄膜,应该能获得较好的阻水性能和力学性能。但PGA加工温度高达230℃,与PBAT加工温度相差甚远(后者通常为160~190℃)。为了将PGA添加到PBAT中,Cai等^[41]提供了一种通过梯度熔融共混制备PGA/PLA/PBAT复合薄膜的方法。即先在230℃熔融共混制备PGA/PLA颗粒,将PGA预先分散在PLA基体中;然后再在190℃将PGA/PLA颗粒与PBAT熔融共混,将PGA通过PLA最终分散在PBAT中。最佳配方下,薄膜对氧气、水蒸气阻隔性能和力学性能优异,对香蕉保鲜效果明显。

Huang等^[42]在PBAT链中引入了间苯二甲酸磺酸盐,磺化后的PBAT具有更高的O₂和CO₂阻隔性能,且具有更高的亲水性和良好的水分散性,可用于调节PBAT的生物降解速率和高气阻生物降解材料,特别是高气阻涂料。这也启发我们,在PBAT中引入少量离子键,有可能解决PBAT薄膜不耐穿刺的难题。但引入离子键可能在缩聚时出现聚合物黏度过大导致分子量提升困难的现象。另外,Wu等^[43]采用长链饱和脂肪酸作为疏水改性剂,通过简单的熔融共混和热压,使PBAT的水汽阻隔性能提高了一个数量级以上。具有中等疏水性的长链饱和脂肪酸在膜内和膜表面结晶形成了宽高比约为10的疏水晶片,这些内部的晶片形成了非常曲折的路径,从而阻碍了水汽的扩散。但长链饱和脂肪酸在共混时可能会导致PBAT的酯键发生断裂,影响复合薄膜的整体性能。

PBAT作为地膜使用,尤其是用于新疆棉花种植时,耐候性常满足不了使用要求,即埋地部分尚未崩解,露天部分却先崩解碎片化了。为了提高

PBAT 耐候性,除了添加高效 UV 吸收剂^[44]、抗氧化助剂^[45],适当改变链结构^[46],将部分或全部对苯二甲酸替换为环己二甲酸或脂肪酸/环己二甲醇组合,也能提升 PBAT 或其衍生物的耐候性。当然,这需要考虑最终成本。

4.3 其他可生物降解塑料的改性

PBS 是具有良好耐热性和加工流动性的可降解聚酯;PPC 是由二氧化碳和环氧丙烷共聚而成的环境友好型材料,具有优异的气体阻隔性和柔韧性;PGA 则具有极高的机械强度和最快的生物降解速率,在自然环境中仅需 45~90 天即可完全降解。在实际的使用中,这些材料通常用来与 PBAT 或 PLA 共混,调控共混体系的降解性能、力学性能和加工性能,以满足不同应用场景的需求。在 PBAT/PLA 共混体系中引入 PBS,能够显著影响共混物的结晶行为、热性能和力学性能^[47]。利用 PPC 优异的气体阻隔性和柔韧性,开发出的 PBAT/PPC 共混薄膜具有高阻隔性、良好机械强度和全生物可降解性,已广泛应用于食品包装、购物袋等领域^[48]。PGA 的引入对 PBAT/PLA 共混体系的性能优化主要体现在机械强度、阻隔性能和降解速率三个方面^[41]。

5 政策现状、挑战与发展建议

5.1 国家禁限塑政策执行现状

近年来,中国加大了对塑料污染治理的力度。2020 年 1 月,国家发展和改革委员会、生态环境部发布《关于进一步加强塑料污染治理的意见》(发改环资[2020]80 号),明确了分阶段、分领域的禁塑限塑目标。2022 年,海南等地陆续实施禁塑法规。然而,政策执行过程中面临诸多挑战。一方面,市场上存在伪降解塑料(如光氧降解塑料、淀粉填充 PE 塑料等)冒充真正的可生物降解塑料,扰乱市场秩序。这类材料仅部分降解或破碎成微塑料,无法完全矿化,可能造成更严重的微塑料污染。另一方面,部分学者强调塑料本身无罪,过度强调物理回收甚至化学回收,无视传统塑料难以 100% 回收的现实,忽视可生物降解塑料作为塑料整体有益补充的重要意义,导致白色污染治理一再走回头路。

5.2 政策执行建议

针对当前政策执行中的问题,提出以下建议:

(1) 严格执行可生物降解塑料标准,打击伪降解塑料产品。应严格执行 GB/T 41010—2021 标准,明确区分完全可生物降解塑料与伪降解塑料,禁止

光氧降解、淀粉/PE 等伪降解产品在国内市场上流通(涉及相应陈旧标准的废除问题)。同时,加强对可生物降解塑料产品的认证和标识管理,提高市场监管力度。

(2) 建立中国自己的可生物降解标准体系。根据应用场景,除了地膜需要 1 年内降解,其他产品大都没必要快速降解,因为快速降解意味着原料/产品货架期较短,产品附加值低。建议适当时候,修改可生物降解国家标准,增加慢降解,即不埋地情况下,产品能用 3~5 年甚至更久,类似 PLA,但一旦埋地,3 年甚至 5 年能降解掉。

(3) 科学分类管理,建立分级管理体系。根据产品使用场景和寿命需求,实施分类管理策略。对一次性使用且难以回收的塑料制品(如快递包装、部分餐具),应强制使用可生物降解塑料;对非一次性但寿命较短的产品,可使用慢降解但性能相对稳定的材料;对长寿命产品,则可使用难降解且耐久性好的材料。

(4) 完善回收体系,推动循环利用。建议由国家组织协调相关部委,制定可生物降解塑料(地膜除外)回收再利用方案。以循环再利用为主,能量回收为辅,实现资源的高效利用。

6 结论与展望

可生物降解塑料作为应对塑料污染的有效手段,近年来在材料设计、改性技术和应用研究方面取得了显著进展。然而,可生物降解塑料的发展仍面临降解标准混乱、监管不严、市场前景不明等挑战。未来可生物降解塑料的发展应注重以下方向:一是加强应用基础研究,提升可生物降解塑料的其他性能,让传统塑料拥护者无话可说;二是开发可控生物降解材料,能够根据环境条件调节降解速率;三是建立全生命周期评价体系,科学评估可生物降解塑料的环境影响;四是完善产业链协同,从原料、加工到废弃处理形成完整闭环。总之,随着全球塑料污染治理需求的增加和“双碳”战略的推进,可生物降解塑料产业将迎来更广阔的发展空间。通过科技创新、政策引导和公众参与的多方协同,可生物降解塑料有望在减少塑料污染、发展循环经济等方面发挥重要作用。

参考文献:

- [1] HOUSSINI K, LI J H, TAN Q Y. Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis

- [J]. *Communications Earth & Environment* Volume, 2025, 6(1): 257.
- [2] FLURY M, NARAYAN R. Biodegradable plastic as an integral part of the solution to plastic waste pollution of the environment [J]. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2021, 30: 100490.
- [3] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 全生物降解农用地面覆盖薄膜:GB/T 35795—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [4] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 生物降解塑料与制品降解性能及标识要求:GB/T 41010—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [5] BHER A, CHO Y, AURAS R. Boosting degradation of biodegradable polymers[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2023, 44(5): 2200769.
- [6] YE H B, LI Q Y, LI J, et al. Review on the abiotic degradation of biodegradable plastic poly(butylene adipate-terephthalate): Mechanisms and main factors of the degradation[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2025, 36(1): 109861.
- [7] NELSON T F, BAUMGARTNER R, JAGGI M, et al. Biodegradation of poly(butylene succinate) in soil laboratory incubations assessed by stable carbon isotope labelling[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5691.
- [8] 王元波, 郑诗玥, 王凡, 等. 塑料生物降解检测方法的研究进展[J]. *生物工程学报*, 2023, 39(5): 1889–1911.
- [9] 林毅, 朱品玲, 严飞, 等. 改性淀粉基生物降解塑料包装的进展[J]. *塑料*, 2024, 53(6): 113–120.
- [10] 高书燕, 李家栋, 陈野, 等. 淀粉基可生物降解材料研究进展[J]. *河南师范大学学报*, 2023, 51(5): 1–14.
- [11] WU C, LI J, ZHANG Y Q, et al. Cellulose dissolution, modification, and the derived hydrogel: A review [J]. *ChemSusChem*, 2023, 16(21): e202300518.
- [12] 王惠婷, 陈宇鉴, 刘诗仪, 等. 海藻酸盐基非织造医用敷料的研究进展[J]. *纺织学报*, 2025, 46(6): 240–249.
- [13] 张佳星, 王玉增, 陈慧, 等. 基于动植物蛋白的生物基塑料研究进展[J]. *皮革科学与工程*, 2021, 31(2): 9–15.
- [14] 林炳荣. 厌氧发酵液为底物合成聚羟基脂肪酸酯(PHA)的研究进展[J]. *中国塑料*, 2024, 38(10): 36–42.
- [15] MCADAM B, FOURNET M B, MCDONALD P, et al. Production of polyhydroxybutyrate (PHB) and factors impacting its chemical and mechanical characteristics [J]. *Polymers*, 2020, 12(12): 2908.
- [16] 迟翔, 王国强. PHB及P34HB的增韧改性进展[J]. *上海塑料*, 2023, 51(5): 19–27.
- [17] DE BEUKELAER H, HILHORST M, WORKALA Y, et al. Overview of the mechanical, thermal and barrier properties of biobased and/or biodegradable thermoplastic materials[J]. *Polymer Testing*, 2022, 116: 107803.
- [18] 张炳. PBAT/PLA复合薄膜阻水改性研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2025.
- [19] 肖世伟, 李亚楠, 李杨. PLA/PCL/HL560生物基医用复合可降解材料的制备与性能[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(1): 14–20.
- [20] ZHAO X P, HU H, WANG X, et al. Super tough poly(lactic acid) blends: a comprehensive review [J]. *RSC Advances*, 2020, 10(22): 13316–13368.
- [21] 陈荣源, 杨晓壮, 安佳豪, 等. 多壁碳纳米管改性PLA/PE复合材料的结构与性能[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(12): 1–7.
- [22] 连雨欣, 郑星莹, 孙晓丽. 可生物降解塑料的改性研究进展[J]. *当代化工研究*, 2024(18): 8–10.
- [23] 谢婷玉, 秦舒浩, 杨琴琴, 等. 增韧改性剂调控聚乳酸复合材料的性能研究[J]. *塑料工业*, 2025, 53(9): 146–152.
- [24] SUI G P, WANG K, XU S M, et al. The combined effect of reactive and high-shear extrusion on the phase morphologies and properties of PLA/OBC/EGMA ternary blends [J]. *Polymer*, 2019, 169: 66–73.
- [25] PARK Y, LEE J. Comparison of recently developed toughening strategies for polylactic acid blends [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2023, 125: 50–57.
- [26] DING Y, LU B, WANG P L, et al. PLA-PBAT-PLA triblock copolymers: Effective compatibilizers for promotion of the mechanical and rheological properties of PLA/PBAT blends [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2018, 147: 41–48.
- [27] QU Y D, CHEN Y H, LING X Y, et al. Reactive micro-crosslinked elastomer for supertoughened polylactide [J]. *Macromolecules*, 2022, 55(17): 7711–7723.
- [28] QU Y D, HONG J T, CHEN Y H, et al. Rigid molecular chains trapped reactive elastomers for high performance PLLA composites with excellent tough-strength balance [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 255: 110619.
- [29] HONG J T, ZHANG J, CAO X J, et al. Designing of reactive micro-crosslinked PBAT as the efficient biodegradable toughener for PLLA [J]. *Polymer*, 2023, 282: 126167.
- [30] CAI K, LIU X, MA X, et al. Preparation of biodegradable PLA/PBAT blends with balanced toughness and strength by dynamic vulcanization process [J]. *Polymer*, 2024, 291: 126587.
- [31] CAI K, WANG D D, LIU X, et al. PLA/PBAT/CaCO₃ composites with balanced super-toughness and stiffness through dynamic vulcanization and double interfacial compatibilization [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2024, 6(21): 13378–13388.
- [32] CAI K, YANG A, YU C, et al. 2-Methylimidazole catalyzes the ring-opening of ADR for large-scale preparation of biobased poly(lactic acid) composite with balanced stiffness and toughness [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 318(2): 144943.
- [33] 黄红军, 万红敬. 生物降解聚合物的阻隔性能研究进展[J]. *广东化工*, 2025, 52(18): 81–85.
- [34] 冯杰, 李上, 胡佳燕, 等. PBAT与天然高分子共混的研究进展[J]. *浙江工业大学学报*, 2024, 23(4): 387–399.
- [35] 孔帅. 高淀粉含量淀粉/PBAT/蒙脱土纳米复合膜的制备及性能研究[D]. 济南: 山东农业大学, 2025.
- [36] BAI J, PEI H J, ZHOU X P, et al. Reactive compatibilization and properties of low-cost and high-performance PBAT/thermoplastic starch blends [J]. *European Polymer Journal*, 2021,

- 143; 110198.
- [37] CAI K, WANG X D, YU C H, et al. Enhancing the mechanical properties of PBAT/thermoplastic starch (TPS) biodegradable composite films through a dynamic vulcanization process[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2024, 12(4): 1573–1583.
- [38] AI J Z, LI S Y, ZHAO Y, et al. Biodegradable PBAT/PPC-P blown film with enhanced mechanical and barrier performances via in-situ reaction compatibilization[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2025, 198: 109147.
- [39] HE H Z, LIU B D, XUE B, et al. Study on structure and properties of biodegradable PLA/PBAT/organic-modified MMT nanocomposites[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2022, 35(4): 503–520.
- [40] ZHOU S J, ZHANG D X, XIONG S J, et al. A high-performance and cost-effective PBAT/montmorillonite/lignin ternary composite film for sustainable production[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2024, 12(40): 14704–14715.
- [41] CAI K, YU C H, WANG L, et al. Design for enhanced mechanical and barrier properties of poly (butylene-adipate-co-terephthalate)/poly (glycolic acid) composite films using biobased poly (lactic acid) as intermediates through gradient reactive extrusion [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 306(3): 141674.
- [42] HUANG F F, WU L B, LI B G. Sulfonated biodegradable PBAT copolyesters with improved gas barrier properties and excellent water dispersibility: From synthesis to structure-property [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2020, 182: 109391.
- [43] WU L B, LIU Z W, WANG L L. Fully Biodegradable superhigh water vapor barrier PBAT films with diffusion-impeded interior crystal plates and a superhydrophobic rough surface[J]. *Macromolecules*, 2025, 58(12): 6238–6248.
- [44] SOUZA P M S, MORALES A R, SANCHEZ E M S, et al. Study of PBAT photostabilization with ultraviolet absorber in combination with hindered amine light stabilizer and vitamin e, aiming mulching film application [J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2018, 26(8): 3422–3436.
- [45] LI H H, AYTIBEKE Y, SIMAYI R, et al. Preparation and weather-resistant study of poly (butylene adipate-co-terephthalate)/poly (butylene carbonate-co-terephthalate)/ modified cotton stalk lignin composite film[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 309(2): 142483.
- [46] 丁婉琦. 耐紫外聚酯树脂的合成及性能[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [47] 黄茂财, 张效林, 常兴, 等. 不同植物纤维增强 PLA/PBAT/PBS 可降解复合材料研究进展[J]. *复合材料学报*. 2024, 41(12): 6370–6385.
- [48] 廖月泉, 史利娟, 裴丰, 等. PBAT/PPC/CaCO₃ 复合材料薄膜的制备及其性能[J]. *塑料工业*. 2024, 52(6): 138–145.

Application status, problems and countermeasures of biodegradable plastics

Cai Kai, Feng Jie*

(College of Materials Science and Engineering, Zhejiang University of Technology,
Hangzhou Zhejiang 310014, China)

Abstract: With the increasingly severe global plastic pollution problem, biodegradable plastics as one of important means to address the issue of white pollution caused by plastics, have received widespread attention in recent years. This article systematically reviews the definition, degradation mechanisms, classification, application status, existing problems and development directions of biodegradable plastics. In light of the implementation status of the “plastic ban and restriction” policy in China since 2020, it puts forward policy suggestions such as the need for hierarchical management and full life cycle assessment of plastic degradation, aiming to provide references for the governance of plastic white pollution in China.

Key words: biodegradable plastic; degradation mechanism; modification; application; development direction