

韩石磊,张付申.废弃生物可降解塑料的处理方法与发展趋势 [J]. 中国环境科学, 2023,43(12):6445-6464.

Han S L, Zhang F S. Disposal methods and development tendencies of waste biodegradable plastics [J]. China Environmental Science, 2023,43(12):6445-6464.

废弃生物可降解塑料的处理方法与发展趋势

韩石磊^{1,2},张付申^{1,2*} (1.中国科学院生态环境研究中心,固体废弃物处理与资源化实验室,北京 100085; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 生物可降解塑料近年来在众多领域得到了广泛应用,废弃后的生物可降解塑料(WBP)制品容易对环境造成污染,其回收处理与资源化利用是这类塑料规模化应用的重要保障.本文介绍了 WBP 的主要处理方法,重点对机械回收、化学回收、生物处理、填埋、焚烧和升级利用进行了阐述,进一步分析了在回收处理过程中遇到的问题,预测了未来发展的趋势,以期 WBP 的绿色处理与资源高效再生循环提供指导.

关键词: 生物可降解塑料; 化学回收; 生物处理; 升级利用; 资源循环

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2023)12-6445-20

Disposal methods and development tendencies of waste biodegradable plastics. HAN Shi-lei^{1,2}, ZHANG Fu-Shen^{1,2*} (1.Department of Solid Waste Treatment and Recycling, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *China Environmental Science*, 2023,43(12): 6445-6464

Abstract: Biodegradable plastics have been widely applied in many fields in recent years. Waste biodegradable plastics (WBP) products may easily cause environmental pollution, thus the disposal and resource utilization of WBP are important guarantees for large-scale application of this type of plastics. This paper summarized the main disposal approaches of WBP, especially focused on mechanical recycling, chemical recycling, biological treatment, landfill, incineration and upgrade utilization. Furthermore, the problems encountered in the treatment process of WBP were systematically analyzed, and the future development trend of WBP recycling was predicted. The main purpose is, to provide guidance for the green and efficient treatment of WBP.

Key words: biodegradable plastics; chemical recovery; biological treatment; upgrade utilization; resource recycling

近年来,世界各国相继出台了一系列关于一次性塑料制品的管理措施^[1],加之对日益短缺石油资源的重视,生物可降解塑料的使用量逐年提高^[2].据报道,2022 年全球生物可降解塑料产能约 126 万 t,主要包括聚乳酸(PLA)、聚对苯二甲酸-己二酸丁二醇酯(PBAT)、淀粉基塑料、聚羟基脂肪酸酯(PHA)等^[3].生物可降解塑料不仅可以缓解石油短缺的现状,还可以降低对环境与人体健康的危害^[4],目前已经在日常生活^[5-6]、农业^[7]、包装、医疗^[8-9]、汽车等领域广泛应用.

1 生物可降解塑料的来源及特点

生物可降解塑料可根据其来源分为生物基可降解塑料和石化基生物可降解塑料,生物基可降解塑料主要是利用生物质如淀粉、纤维素、木质素、壳聚糖等作为主要原料生产生物可降解塑料^[10].石化基生物可降解塑料是以煤、石油等化石能源为主要原料生产生物可降解塑料.如图 1 所示,部分生物

基塑料的原料来自生物质,但不一定能被生物降解,其生物降解性是根据降解的途径以及降解速率确定的^[11-12];还有部分生物可降解塑料是化石燃料基,但可以被生物降解.典型的例子是生物基聚对苯二甲酸己二醇酯(PET)来源于可再生资源,但不能被生物降解,相反聚己内酯(PCL)是石油基塑料,但是可以完全被生物降解^[13].常见的生物可降解塑料的合成方式、优缺点和降解环境如表 1 所示.

传统塑料的不可降解性破坏了生态平衡,并且由于缺乏有效的处理方法,大部分塑料废弃物被焚烧,造成大量温室气体排放^[14].生物可降解塑料虽然能有效改善传统塑料存在的问题,但是,废弃生物可降解塑料(WBP)制品如果不采取恰当的处理方法,同样会对环境造成危害^[15-16].生物可降解塑料可以

收稿日期: 2023-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778606);中国科学院生态环境研究中心碳达峰碳中和生态环境技术专项(RCEES-TDZ-2021-31)

* 责任作者, 研究员, fszhang@rcees.ac.cn

在自然环境中通过光、热、湿度和化学条件以及生物活性等环境因素影响,使聚合物发生链断裂、化学转换和物理变化^[17],最终分解成 CO₂ 和 H₂O,一般认为不需要进行回收.实际上,生物可降解塑料通常用作一次性材料,并且成本高于传统塑料.WBP 只利用环境中的微生物进行降解处理而不采取回收处理,将会导致更多的碳排放和资源浪费.因此,从资源利用和低碳排放的角度出发,必须对 WBP 进行回收处理^[18].

另一方面,从循环经济的视角分析,WBP 的循环利用同样需要关注.图 2 是 WBP 处理方案的循环与管理等级,可根据实际情况选择合适的处理方法^[19-20].本文围绕近年来国内外 WBP 的处理研究,对其处理方法归纳总结,分析了机械回收、化学处理、生物处理、填埋、焚烧、升级回收的优缺点,并结合目前的处理方法预测了 WBP 处理方法的发展趋势,以期 WBP 资源的高效回收利用提供参考.

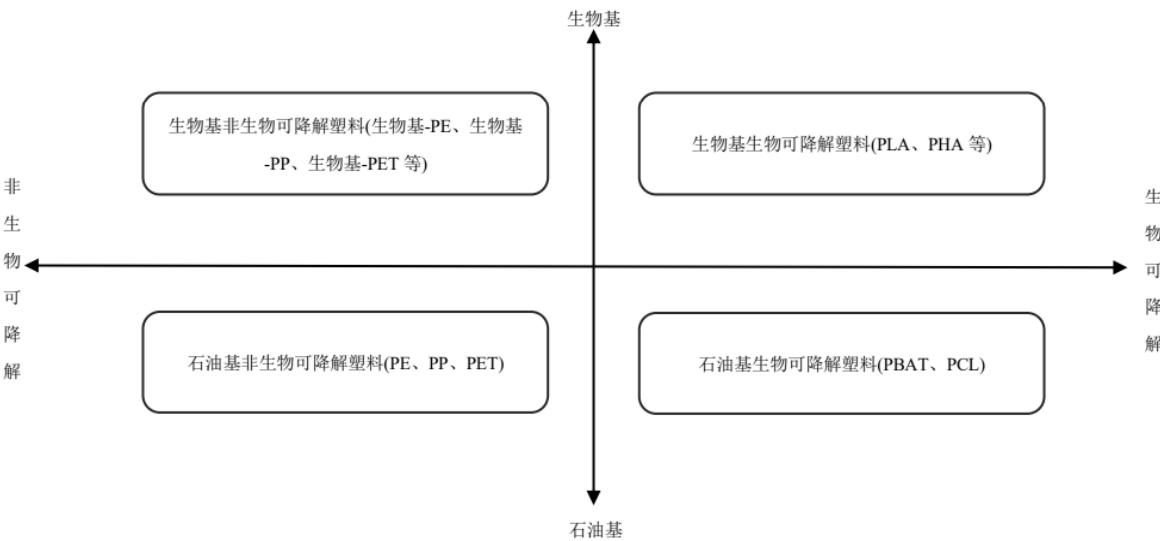


图 1 生物可降解塑料的来源^[21]
Fig.1 Original sources of biodegradable plastics^[21]

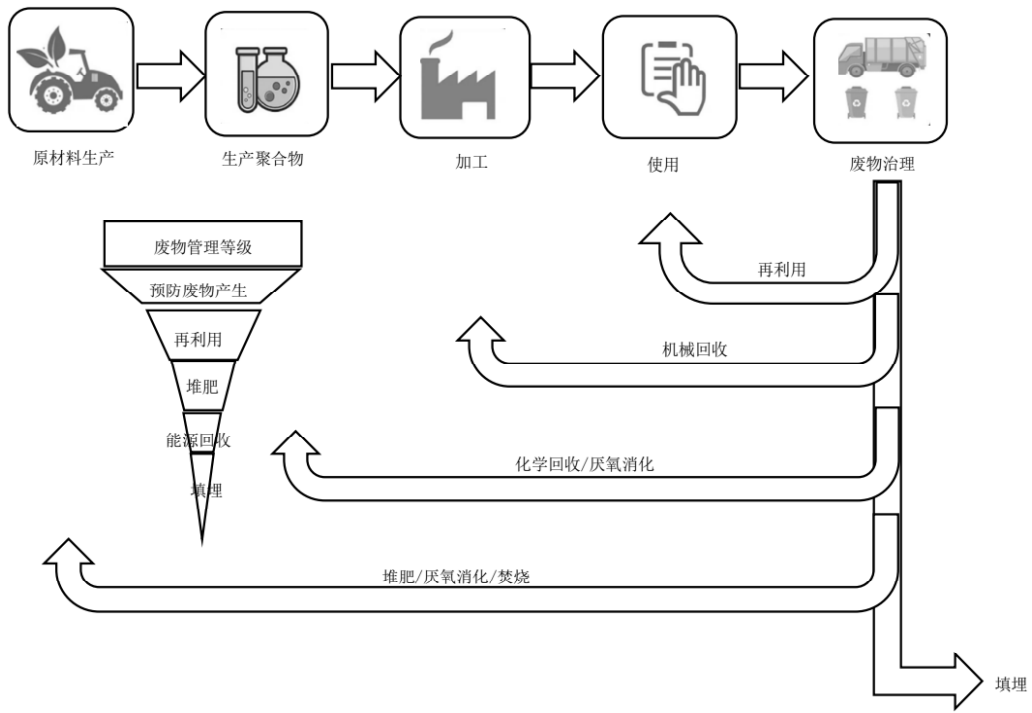


图 2 生物可降解塑料处理方案中的再生利用与管理级别^[20]
Fig.2 Grade of recycling and management for the treatment options of biodegradable plastics^[20]

表 1 不同种类生物可降解塑料的特点
Table 1 Properties of different types biodegradable plastics

名称	合成方式	优点	缺点	降解环境
PLA ^[22]	利用乳酸聚合作用合成高分子聚合物	良好的生物相容性和可降解性	韧性差、硬度高弹性和柔韧性较差, 熔体强度低, 结晶速率慢	水性环境 可控堆肥条件
PHA ^[23]	微生物合成的胞内聚酯	良好的生物降解性和生物相容性	结晶度高且热稳定性较差	水性环境 可控堆肥条件
PBAT ^[24]	以对苯二甲酸、己二酸、1,4-丁二醇为主要原料, 用直接缩聚法或扩链法聚合制备	较好的耐热性和冲击性能, 柔韧性强	对氧气和水汽阻隔性能差, 降解速率慢	水性环境 可控堆肥条件
淀粉塑料	采用水解、高压酯化、缩聚使淀粉完全酯化反应得到长链淀粉酯胶质体	来源广泛、价格低廉、降解产物安全无毒	力学性能、耐水性、机械性能以及印刷性能较差	土壤条件 可控堆肥条件
PCL	以 ϵ -己内酯为原料合成的开环聚合物	良好的生物降解性、优异的药物透过性	高结晶性能、熔点过低	水性环境 可控堆肥条件
PBS(聚丁二酸丁二醇酯) ^[25]	以 1,4-丁二酸和 1,4-丁二醇为原料聚合而成的脂肪族聚酯	良好的生物相容性和生物可吸收性、生产成本低、熔点较高, 力学性能、耐热性能好	PBS 摩尔质量较低, 分子链中长支链少, 熔体黏度小, 熔体强度低, 缺少活性反应点且降解速率较慢	可控堆肥条件
PGA(聚羟基乙酸) ^[26]	乙醇酸是正常人体在新陈代谢过程中产生的, PGA 则为乙醇酸的聚合物	良好的生物降解性和生物相容性	成本较高、稳定性较差	水性环境 可控堆肥条件

2 可降解塑料的处理方法

2.1 机械回收

机械回收是常见的一种 WBP 回收方法,优点是投资少、技术参数可控、操作简单^[30],其流程包括回收、分类、研磨、再加工四个步骤^[31-32].机械回收 WBP 可分为开环回收与闭环回收,闭环回收亦称为初级回收,是对废弃物的再处理与再利用,能够回收高质量产品.闭环回收要求原料清洁、无污染、类型单一;开环回收亦称二次回收,需对回收的塑料再加工,其再加工的产品可作为原料用于其它领域.机械回收的机理是利用机械物理作用发生的物理化学反应以及机械力化学效应,回收废旧生物可降解塑料.在强烈的多种机械力及摩擦热的综合作用下,WBP 内部分子链断裂生成机械力活化原子基团,即自由基.网状交联大分子聚合物随分子链的断裂,形成更小的网状交联单元.交联密度下降,产生低聚交联的高聚物.从而实现塑料的再生回收和循环利用^[33-34].

生物可降解塑料产品与传统塑料制品在外观与手感上相似,不易区分,因此 WBP 在回收过程中容易混入传统塑料,而 WBP 的混入对塑料回收率以及产物的性能都会产生影响^[35].机械熔融回收 WBP 和传统塑料的混合物,其机械性能与单独熔融回收的传统塑料相比会下降,主要是因为 WBP 与传统塑料不能完全混熔^[36-37].Aldas 等^[38]研究表明,WBP 的混入会降低回收的聚对苯二甲酸己二醇酯(PET)机械性能,并且对其外观也会产生影响.单一种类的 WBP

经过多次机械处理,会导致其链断裂过程中发生化学结晶,因此性能也有所下降.Akesson 等^[39]采用挤压成型对聚羟基丁酸酯(PHB)多次再循环处理,通过测试聚合物结构与热机械性能评估其回收性,经过两次挤压循环后,材料的物理性能显著降低,第三次循环后,拉伸强度降低 50%以上.为解决机械回收处理 WBP 性能下降的问题,有研究人员利用多次挤出的聚合物采用共混机械循环或添加扩链剂的方法进行改善,例如 PLA 的脆性可以与 PBAT 共混解决,热塑性淀粉的吸湿性可以与亲水性差的 PBAT 混合解决^[40].Beltran 等^[31,41-42]将回收的 PLA 与原始聚合物共混并添加少量扩链剂和有机填料用于改善回收的 PLA 性能,结果表明其有助于提高 PLA 的可回收性,并减小材料对环境的危害.

WBP 中掺杂其它塑料会给机械回收带来一定难度,因此需要开发出集分类与收集于一体的技术,从而将 WBP 与其它种类的塑料进行有效分离.目前,适用于传统塑料的分类技术较为成熟,但分离 WBP 与传统塑料的设备与方法并不多,近红外光谱分选(NIR)是分离 WBP 与传统塑料的常用技术.美国的 Nature Works 公司用 NIR 有效分离了 PLA 与 PET,有效降低后续回收工作的压力^[16,43].Wojnowska 等^[30]利用 NIR 测试 PLA 在混合废塑料中的分离效果,结果表明 NIR 可以有效分离 PLA,并且生物基塑料不会干扰传统塑料的回收.Chen 等^[44]用 NIR 对塑料废弃物进行分选,通过对 PLA 的物理和光谱特性研究,确定了 PLA 可以从常规塑料中分离,并且 PLA 不影

响常规塑料的检测与分类过程.

生物可降解塑料的机械回收都是基于热机械再加工,没有过多成熟的工业设施,多数研究仍在实验室进行.因此 WBP 机械处理的关键是解决回收塑料掺杂问题,完善闭环回收的工艺,从而保证回收产品的质量.目前,机械回收的价格评估按 1t 处理量进行计算,直接挤出成型的成本为 88.64 元,直接造粒的成本是 105.08 元,相对于用原材料直接生产生物可降解塑料,机械回收 WBP 的利润相当可观^[45].

机械回收生物可降解塑料的中试应用是 Soroudi 等^[46]以废弃 PLA 为研究对象,测试了废弃物的机械性能、流变性能、热性能以及稳定剂对废弃 PLA 性能的影响,发现中试规模上废弃物的机械循环最高可达 7 次,废弃 PLA 再处理的冷却过程中结晶度会随着注

射循环次数的增加而增加,这可以通过注射过程中链断裂引起的链迁移率较高,稳定剂的加入在冷却过程中会抑制结晶.此外,PLA 的大部分机械性能会迅速变弱,导致无法用于聚合物的工业应用,这种性能的下降可通过流变实验和分子量测试解释.并且发现酐是一种有效稳定剂,可以捕获自由基并在加工温度下随着时间的推移保持 PLA 的链长.

2.2 化学回收

化学回收是通过化学反应改变聚合物的化学结构,将 WBP 分解成低聚物或单体用于合成新材料,从而实现重新制作产品并且不会降级循环的目标^[47].化学回收 WBP 可根据反应条件的不同分为醇解、水解、酶促降解、还原解聚、糖醇解等^[47].表 2 是化学回收和机械回收的研究结果、实验方法、技术参数的汇总.

表 2 机械回收和化学回收生物可降解塑料的研究方法、获得的结论或最终产品^[27-29]
Table 2 Research methods, conclusions or final products of mechanical and chemical recoveries of biodegradable plastics^[27-29]

回收方法	生物可降解塑料类型	方法/技术参数	结论/最终产品
机械回收	PLLA(左旋聚乳酸)	注射成型温度 175~190℃	该过程可以重复多达 5 次循环.从第 6 次循环开始,拉伸强度和断裂伸长率急剧下降
	PLA	挤出(145~190℃)+注塑(180~210℃)	分子量降低,降解温度降低,拉伸强度降低
	PLA	在 180℃ 下挤压压缩成型	该过程可以重复多达 5 次循环.在第 6 次循环中,物理性能显著降低.
	PHBV(3-羟基丁酸酯和 3-羟基戊酸酯的共聚物)	在 170℃ 下挤出和注射成型	这个过程可以重复 5 次循环.在第 5 次循环周期后,性能略有下降.
	PHB	在 170℃ 下挤压和压缩成型	该过程可以重复多达 3 次循环周期.
	PLA/PHB	挤出和压缩成型	一种接枝的 PLA/PHB 混合物具有更好的物理性能
	PLA/PHBV	175~180℃ 挤压成型	该过程可以重复多达 6 次循环.在此之后,分子量和拉伸强度显著降低
	PCL	95~110℃ 注射成型	该过程可以重复多达 10 次循环
	PBS	190~210℃ 挤压成型	该过程可以重复 3 次循环
	PLA/PBAT	150~180℃ 挤压成型	该过程可以重复 5 次循环
	PLA/PBS	190℃ 注塑成型	该过程可以重复 7 次循环
	PLA/TPS	挤出及和注射成型	PLA/TPS 混合物与纯 PLA 相比不适合回收利用
化学回收	PLA	水解	乳酸
	PLA	醇解	乳酸烷基酯
	PHB/PHBV	催化剂热解	用于生产聚(巴豆酸-共丙烯酸)的巴豆酸和 2-戊烯酸
	PCL	锌催化剂的甲醇分解	6-羧己酸甲酯
	PBS	热解	1,3-丁二烯,酯,二聚体,四氢呋喃,环戊酮,二异氰酸酯己二甲酯
	PLA	三氮杂环癸烯(TBD)催化剂醇解	乳酸酯
	PLA	FeCl ₃ 作为催化剂的醇解	乳酸甲酯
	PLA	钛酸四丁酯(TBT)为催化剂的醇解	单乳酸盐
	PLA	醋酸锌二水合物(ZnAc)和 4-(二甲胺基)吡啶(DMAP)酯交换催化剂的	乳酸甲酯与乳酸乙酯
		醇解	
	PBAT	水解	降解率达到 80%以上
	PBAT	酶促降解	特定离子对 PBAT 膜的酶降解速率与酯键酶水解的速率有关
	PCL	脂肪酶降解	甲苯溶剂可以控制降解与聚合的过程
	PCL/PLA/PET	还原解聚	1,6-己二醇、1,2-丙二醇、对二甲苯和四氢呋喃增值产品
	PLA	还原解聚	钌基催化剂(Ru-PNN)可以将 PLA 解聚为丙二醇(PG)
	PET	糖醇解	糖醇解有利于积累更多酯化产物
	3-羟基丁酸酯(P3HB)	糖醇解	木糖的碳产率从 19%提高到 24%,甘油的碳产率从 30%提高到 43%

2.2.1 醇解 根据试剂的不同,醇解可分为甲醇解聚与乙醇解聚,常用的是甲醇解聚.醇解适用于生物基生物可降解塑料和石油基非生物可降解塑料,如利用甲醇可以将聚乳酸(PLA)转化为乳酸甲酯,同样使用甲醇也可以对聚对苯二甲酸己二醇酯(PET)进行解聚^[48].醇解的机理是以甲醇或乙醇作为溶剂对高分子聚合物起到溶解-解聚的作用,同时作为反应物起到酯交换作用,因此聚酯的降解反应是在聚合物分子链的无规则断裂和聚酯结构中进行酯交换反应的双重作用下发生^[49].

不同种类的醇,可以通过酯交换反应破坏 PLA 的酯键产生乳酸酯,同时还需要酯交换催化剂才能实现 PLA 在相对温和的反应条件下充分解聚^[50-51].目前,大多数醇解研究聚焦在可控生产聚乳酸的催化剂.Leibfarth 等^[52]利用三氮杂环癸烯(TBD)催化剂,将废弃 PLA 在室温条件下转化为乳酸酯,并且完全保留乳酸物种的化学成分.Liu 等^[53]将 FeCl_3 作为催化剂,回收 PLA 甲醇解聚的乳酸甲酯,在最佳反应条件下,PLA 的转化率达到 96.0%,乳酸甲酯的回收率达到 87.2%,并且 FeCl_3 可以在给定条件下至少重复使用 6 次.Xie 等^[54]以 PLA 为研究对象,四甲基氟化铵(TMAF)作为催化剂,发现商用 PLA 颗粒可以完全被甲醇解聚,产率接近 100%,并且 TMAF 可以重复使用.

为了进一步提高醇解回收 WBP 的效率,实现对 WBP 的规模性回收,研究者对实验方法进行了诸多改进.Nim 等^[55]为提高醇解效率,开发了利用多种醇对废弃 PLA 醇解的工艺,以 1,3-丙二醇(PDO)、丙二醇(PG)和甘油(Gly)为原料,钛酸四丁酯(TBT)为催化剂,采用微波反应器进行醇解反应,通过对产物的组成和结构分析,其醇解产物主要是单乳酸盐,表明此工艺在长链 PLA 的酯键裂解应用具有较高效率.Lamberti 等^[56]为实现 PLA 的大规模回收,采用醋酸锌二水化合物(ZnAc)和 4-(二甲氨基)吡啶(DMAP)酯交换催化剂进行测试,最终将甲醇和乙醇转化为增值产品乳酸甲酯与乳酸乙酯,结果表明该反应分为两步,第一步反应活化能为 73kJ/mol,第二步反应活化能为 40.16kJ/mol,当两种催化剂的比例相等时,反应会出现协同效应,会产生最高的反应速率,由于这两种催化剂的价格低廉,因此这种协同效应有利于 PLA 的大规模回收.

2.2.2 水解 生物可降解塑料的水解是指脂肪族聚酯的解聚,主要由聚合物主链键类型决定其键断裂动力学^[17],通常需要在高温、高压、添加酸催化剂的条件下处理^[57].生物可降解塑料的水解机理是藻类、真菌、细菌等天然微生物利用现有的酶,催化聚合物的链发生断裂,最终产生单体和低聚物的过程.水解主要通过表面侵蚀或整体侵蚀进行.生物可降解塑料表面和内部均会发生整体侵蚀,通过水在聚合物无定型区域的扩散引发水解反应,低聚物缓慢扩散到聚合物表面后逐渐溢出^[58-59].表面侵蚀从聚合物表面开始,聚合物的体积减小,并且表面侵蚀速率远高于整体侵蚀,表面侵蚀是疏水聚合物、半结晶聚合物以及水解速率较快的聚合物发生降解的主要机制^[60].

WBP 水解处理的缺点是工艺复杂、成本高、水解慢.目前,已有学者在探究生物可降解塑料在不同条件下的水解速率,从而总结出最佳的降解条件.Yagihashi 等^[61]采用控制变量法,对 PLA 的降解进行探究,发现在碱性水热条件下更有利于 PLA 的降解,结果表明 PLA 的降解反应发生在颗粒表面,限速步骤是产物在表面的溶解反应.Bano 等^[18]采用水解法,对 PBAT 进行了高效的环保回收,将 PBAT 加入到含有 KOH 的乙醇溶液中进行水解实验,发现 PBAT 的降解率达到 80%以上.对整个回收过程的碳排放进行评估发现,其碳排放量仅为生物降解的一半,并且剩下的反应溶液可以多次循环利用,这种高效环保的水解方法可以为 WBP 的回收提供新的思路.

2.2.3 酶促降解 酶促降解是一种较为新颖的 WBP 回收方法,优点是反应条件温和并且能耗较低,缺点是技术不够成熟,对于结晶度高且分子间作用力大的聚合物 PHA 和 PCL,需要较长的时间才能完成降解.此外,酶促降解所需的酶催化剂是一种蛋白质催化剂,因此对降解的温度要求较高.酶促降解主要是由酶促过程驱动,酶通过降低反应的活化能,实现在不利条件下提升反应速率^[17].具体机理是酶促酯键水解,使聚合物骨架裂解,以 3-羟基丁酸酯(PHB)降解为例,Lai 等^[62]研究了 PHB 解聚酶的结构与 S39A 突变体和三聚体 R-3-PHB 底物的甲酯络合.主酰胺基团的 S40 和 C250 形成了氧阴离子空穴,裂缝位于 PHB 解聚酶的表面,通过几种疏水残基的疏水相互作用,有利于底物结合,13 个疏水残基位于缝

隙周围,有助于酶与 PHB 底物的结合,活性残基作为亲核试剂攻击底物的酯键,聚合物骨架断裂,解聚生成单体和低聚物,实现生物可降解塑料的降解。

国内外学者通过探究酶催化剂在不同条件下对 WBP 降解情况的影响,总结出合适的降解条件,从而为酶促降解提供技术指导。Zhang 等^[63]采用酶促降解法,以 PBAT 为研究对象,探究特定离子对聚酯薄膜酶降解的影响,在离子强度为 10mmol/L,温度 50℃ 的条件下,阳离子和阴离子的质量损失率分别为 $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$,结果表明特定离子对 PBAT 膜的酶降解速率与酯键酶水解的速率有关。Bi 等^[64]采用熔融缩聚法,合成聚丁二酸丁二醇酯(PBS),利用脂肪酶进行酶促降解,发现酶促降解速率会随共聚物中丁二醇与己二醇的比例而变化。因此 PBS 具有可调节的酶降解性,从而有望成为传统塑料在农业与包装中的替代品。Feghali 等^[65]提出对环境无害的聚己内酯(PCL)回收过程,采用酶促降解方法,在脂肪酶的作用下,PCL 在 60℃,干甲苯有机溶剂中酶解 24h,发现干甲苯溶剂可以控制降解与聚合的过程。Sukkhum 等^[66]采用统计分析方法,优化 3L 气升发酵罐 PLA 降解酶的生产环境条件,发现 *Actinomyces keratinilytica* NBRC 104111 菌株 T16-1 产生的 PLA 降解酶具有将 PLA 降解为乳酸的潜力,其可用于 PLA 聚合物的循环利用。Wei 等^[67]采用酶促降解方法,以 PCL 为研究对象,发现水环境中 Amano 脂肪酶对 PCL 的酶促水降解可以迅速产生大量微塑料颗粒,0.1g 的 PCL 可以产生数百万颗粒,平均粒径为 10μm,只有少数达到 60 μm。生物可降解塑料具有降解的优势,但是也伴随产生微塑料的风险,因此有必要完善 WBP 的回收处理方法。

2.2.4 还原解聚 还原解聚一般采用催化方式进行,其方法在均相催化条件下使用还原剂,使 C-O 键断裂,从而将生物可降解塑料转化成新化学原材料,主要适用于生物基生物可降解塑料^[68]。Feghali 等^[69]以氢硅烷作为还原剂,对聚醚、聚酯和聚碳酸酯几种聚合物材料进行还原解聚,此方法的优点是,在室温下选择性的将传统塑料与 WBP 转为功能性化学物质醇和酚。Eernandes 等^[70]采用还原解聚的方法,以 $\text{Zn}(\text{OAc})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 为催化剂对 PCL、PLA、PET、聚对苯二甲酸丁二醇酯(PBT)废弃物进行解聚,最终得到 1,6-己二醇、1,2-丙二醇、对二甲苯和四氢呋喃

增值产品,并且发现该催化剂至少可以重复循环使用 7 次。Alberti 等^[71]采用钌基催化剂(Ru-PNN)对 PLA 进行加氢还原解聚,发现 Ru-PNN 可以将 PLA 解聚为丙二醇(PG)。

2.2.5 糖酵解 糖酵解是塑料聚合物在酯交换催化剂的存在下,通过酯键断裂并用羟基末端取代的过程,主要适用于石油基塑料 PET^[72]。糖酵解的优点是反应条件温和、试剂和产品无毒、产品易于分离纯化,缺点是在没有催化剂加入的条件下,糖酵解反应速率较低,但是加入催化剂会使催化剂难以从产物中分离,并且会产生副反应与杂质^[73-74]。糖酵解处理 PET 的机理是亲核攻击,PET 的羰基向亲电子试剂提供孤对电子,在过渡态形成新的极性键,羰基获得暂时的正电荷,更强烈的吸附富电子亲核试剂,从而发生反应产生不同的产物^[75]。

目前,糖酵解回收 WBP 的文献较少,多数研究主要集中在提高糖酵解的回收产率。Castro 等^[76]采用糖酵解的方法,以 PET 为研究对象,探究了南极念珠菌脂肪酶和腐质霉角质酶催化 PET 糖酵解的能力,发现糖酵解有利于积累更多酯化产物,此发现为 WBP 的回收提供了新方法。Zheng 等^[77]为降低生物可降解塑料的生产成本,为 3-羟基丁酸酯(P3HB)的生产找到更便宜的碳源,即木糖和甘油,通过非氧化糖酵解(NOG)途径可以明显提高产品回收率,之后将磷酸酮醇酶引入,并将此过程设计成利用大肠杆菌完成,木糖的碳产率从 19%提高到 24%,甘油的碳产率从 30%提高到 43%。

化学回收 WBP 的方法多种多样,然而成本问题阻碍了其发展,因此,不仅需要提高塑料回收产率,还需要降低回收的成本。Sriaram 等^[78]主要对塑料转化为高能燃料进行研究,塑料的利用不当,会导致最终流入垃圾填埋场,从而造成资源的浪费。通过对塑料进行催化热解生产汽油、柴油和减压瓦斯油进行了讨论,介绍了使用催化剂生产热解使用的能源,催化剂的使用降低了塑料转化为燃料的活化能,同时也提高了产品的选择性。对技术经济进行分析,评估化学回收技术能否商业规模进行,处理量按每天 12t,工厂由一个反应器组成。投资成本包括直接成本和间接成本,直接成本包括购买设备和安装有关仪表仪器、管道、电气、建筑、服务设施和征地费用等,间接成本包括承包商费用和其他开支,通过对购买设备成本进

行估算,这些固定资产花费范围从 1 万\$到超过 100 万\$.制造成本按每日处理 12t 计算,32%的成本是公用设施成本,26.4%是维护成本,原料和劳动约占制造总成本的 32%.可变生产成本中材料成本是 5 ¢/kg,电费为 11.7 ¢/(kW·h),运行维护成本约为每年总设备成本的 3%,折旧率按 10%.除此之外,在原料处理方面,收集、分类、洗涤、剪切、运输、电能、加热气体和冷却水等都会影响燃料生产的经济性.

2.3 生物处理

可以通过堆肥和厌氧消化的方法对 WBP 处理.

堆肥是一种在高温下控制的固态发酵,可以将废弃物转化为类似腐殖质的物质.厌氧消化是在缺氧条件下将废弃有机物分解,最终产物中的沼气,可用于供热与发电^[79].

堆肥和厌氧消化的主要机理是聚酯中存在不稳定的酯键,很容受到相应酶的攻击,从而发生解聚生成单体和低聚物,而单体通过细胞膜进入细胞,由 β-水解酶作用,最终在无氧或缺氧条件下产生 CH₄,在有氧条件下生 CO₂ 和 H₂O^[59,80].表 3 列出了常见环境中的微生物以及所对应的生物可降解塑料^[81].

表 3 可降解塑料的降解微生物^[81,83-85]
Table 3 Degrading microorganisms for degradable plastics^[81,83-85]

来源环境	菌属及条件	菌株	生物可降解塑料
土壤	革兰氏阴性菌 30℃	<i>Acidovorax delafieldii</i> BS-3	PBS、PBSA
活性污泥	革兰氏阴性菌 37℃	PBSA-1/ <i>Burkholderia</i> sp.	PBSA
堆肥	革兰氏阴性菌 pH 值 6.0,40℃	<i>Sphingobacterium</i> sp. S2	PLA
农业	革兰氏阳性菌 pH 值 7.0,30℃	<i>Streptomyces</i> sp.	PLA、PBS
海水和海洋沉积物	需氧,革兰氏阴性菌 pH 值 9.5~10, 30~37℃	<i>Alcanivorax borkumensis</i> ABO2449	PCL、PHBV、PBSA、PHB、PLLA
堆肥	革兰氏阳性菌;pH 值 5.5,60℃	<i>Bacillus sinithii</i> PL 21	PLLA
土壤和淡水	需氧,革兰氏阴性菌;30℃	<i>Leptothrix</i> sp. TB-71	PBSA、PCL、PES
温泉	需氧,革兰氏阴性菌;pH 值 7.0,50℃	<i>Ralstonia</i> sp. MRL-TL	PCL、PES、PLLA、PHB、PHBV
厌氧消化	厌氧,革兰氏阳性菌;pH 值 7.0,35℃	<i>Clostridium</i> sp.	PCL
污水污泥	细菌;pH 值 7.0,35℃	<i>Clostridium</i> sp.	PCL
森林土壤	革兰氏阳性菌;pH 值 10.0,70℃	<i>Actinomadura keratinilytica</i> T16-1	PLLA
厌氧消化	厌氧,革兰氏阳性菌;pH 值 6.8,37℃	<i>Clostridium botulinum</i>	PHB、PHBV
堆肥	需氧,革兰氏阴性菌;pH 值 8.0,37℃	<i>Pseudomonas lemoignei</i> LMG 2207	PHB

2.3.1 堆肥 堆肥的优点是可以在土壤中长期储存碳,同时堆肥产物还可以用作土壤改良剂改善土壤结构,缺点是产物以二氧化碳的形式增加碳排放,加剧全球变暖^[20].堆肥是 WBP 有效的回收处理方法,可以有效避免 WBP 进入垃圾填埋场.但是,WBP 与传统塑料混合对堆肥处理的质量与市场适应性会产生负面影响.因此,在考虑产物的市场、用途、成本等问题的同

时,需要加强有机废弃物的分拣与不可堆肥传统塑料的回收^[20].欧盟国家的有机回收由垃圾填埋场推动,要求成员国减少 WBP 进入垃圾填埋场,并采取相应措施鼓励进行 WBP 的单独收集与处理^[82].

生物可降解塑料可以利用微生物降解,但生物可降解塑料产品不一定都可以进行堆肥处理^[13],表 4 总结了 WBP 生物处理的方法与条件^[20].

表 4 废弃生物可降解塑料的生物处理方法及适用塑料类型
Table 4 Biological treatment methods and applicable types of waste biodegradable plastics

处理方法	微生物	温度	适用塑料
堆肥	真菌、细菌、放线菌	≤35℃(家庭堆肥)	PHA、PBAT
		50~60℃(工业堆肥)	PLA、PHA、PBAT
厌氧消化	细菌	≤35℃(嗜温消化)	PHA、淀粉/PCL
		50~60℃(嗜热消化)	PLA、PHA、淀粉/PCL

WBP 的堆肥生物降解受多种因素影响,不同的聚合物结构和形态对降解的有效性具有重要作用,聚合物的高结晶度和界面的强氢键会抑制酶的攻击,常见的温度、pH 值、分子量、水分、疏水性等也是影响堆肥降解的因素^[89-90].Artham 等^[91]发现复杂的聚合物链使酶难以进入主链,并且高结晶度的聚合物解聚速率会更低,环境中的温度和水分含量也会影响聚合物降解速率.

堆肥中的微生物对生物可降解塑料的降解效果至关重要,利用合适的微生物可以有效提高降解的效率.Satti 等^[92]以 PLA 为研究对象,在堆肥条件下利用 *Sphingobacterium* sp.S2 菌属产生的脂肪酶探究降解效果,发现产生的脂肪酶能够有效解聚 PLA.Sakai 等^[93]发现在堆肥发酵罐中分离出来的 *smithii* 芽孢杆菌,在 60℃、pH 值为 5 的条件下可以对 PLLA 进行降解.Hu 等^[94]在堆肥聚脂薄膜中分离出 100 多株细菌,主要为放线菌和芽孢杆菌两大类,其中 *Thermobifida alba* 菌株 AHK119 被证明具有显著降解脂肪族-芳香族共聚酯膜的能力.Akbar 等^[95]从污泥样品中分离出 *Streptomyces* 链霉菌 AF-111,通过在优化条件下制备出 PBBV 解聚酶,实验发现 AF-111 的解聚酶可以有效降解 PHBV.

近年来,国内外研究者在堆肥处理 WBP 研究方面取得较大进展,探究了不同条件下 WBP 的降解效果和对环境影响.Sintim 等^[96]采用堆肥和土壤降解的方法,以 PBAT 和淀粉复合塑料、淀粉和聚酯复合塑料、PLA 和 PBAT 复合塑料,三种不同种类塑料作为研究对象,发现温度对堆肥和土壤降解都有影响,且 PLA 和 PBAT 复合塑料在堆肥处理中更容易降解.Markowicz 等^[97]采用堆肥处理方法,对 12 种不同种类的购物袋进行实验,研究了堆肥处理对 WBP 产生的影响,发现堆肥会产生微塑料和纳米塑料形式的污染.研究者为了提高 WBP 的降解效果,通常采用添加高蛋白质含量的物质增加生物可降解塑料中可溶性糖的含量,例如 PLA 与玉米混合,玉米的存在会增强 PLA 在堆肥中的生物降解性,因此微生物可以有效地降解 PLA^[98-99].目前,可控堆肥可以调节合适的温度、湿度、pH 值条件,因此其降解效率优于 WBP 在土壤和水环境中的降解效果^[100].

堆肥处理 WBP 与其他几种名处理方式相比,处

理量更大,并且适用于多种废弃塑料制品,因此,堆肥处理的花费也至关重要,Kooduvalli 等^[101]将可堆肥降解的咖啡包装袋作为研究对象,在当地工业规模的堆肥设施进行实验,利用田纳西大学斯维尔分校现有的堆肥设施进行生命周期评估,测试表明在堆肥条件下咖啡包装 46d 内完全降解,每年堆肥处理 112500 个咖啡包装袋的花费为 176.29 \$,与传统的包装堆肥处理花费相比,每年可以降低 44%的成本.同时,废弃物生命周期结束时还创造增值产品用于校园的花园和农场.

Weng 等^[102]在中试规模堆肥条件下探究了聚羟基丁酸-共羟基戊酸酯(PHBV)的降解情况,PHBV 的堆肥测试根据 ISO 16929 进行,测试周期为 12 周,降解程度是根据总固体的质量计算,数据显示 PHBV 薄膜逐渐分解为小尺寸的残留物,15d 后薄膜出现多处空腔,然后被分解成碎片,经过 39d 的降解后,很难在堆肥中找到薄膜,在测试最后没有发现大于 2mm 的碎片,PHBV 薄膜在中试规模和实验室的堆肥降解率分别为 100%和 81%.

2.3.2 厌氧消化 厌氧消化的优点是可以利用可降解生物质与有机废弃物产生沼气,作为清洁能源利用,并且厌氧消化严格限制了恶臭排放^[103].

厌氧消化降解效果主要与生物可降解塑料的理化性质和外部环境条件有关^[86].生物可降解塑料理化性质影响降解的因素主要包括分子量、表面积、玻璃化温度、结晶度等;外部环境影响因素包括微生物、C/N、pH 值、温度等^[104].各类影响因素对厌氧消化降解机理与实际效果见表 5^[86].

国内外研究者对厌氧消化处理 WBP 进行了大量实验,获得了厌氧消化所需要的数据,从而为高效处理 WBP 提供数据支持.影响厌氧消化的一个重要参数是原料的 C/N,大多数的生物可降解塑料含有碳却没有氮,为了解决上述问题,研究者将生物可降解塑料与蛋白质的共消化碳氮比进行调整.Cazaudehore^[105]建议厌氧消化的碳氮比调为 20:1 至 30:1,可以防止氨中毒,对于富含蛋白质的废弃物碳氮比调为 6:1 至 16:1.Jin 等^[106]采用厌氧消化的方法,评价了 10 种常见生物可降解塑料在中温和高温条件下的厌氧降解性能,发现有 4 种生物可降解塑料在中温条件下降解率为 57.9%~84.6%.在高温条件下有 5 种生物可降解塑料的降解率达到 53%~95.7%,

根据形态学与微观结构分析,生物可降解塑料的降解是通过表面侵蚀进行的.中温条件下厌氧菌目、拟杆菌目、梭菌目、SBR1031 和协同菌目在发酵过程中起到重要作用,在高温条件下,大部分的生物可降解塑料的水解、产酸和产甲烷是由共热菌与古菌起作用.Gadaleta 等^[107]采用厌氧消化和堆肥两种处理

方法,以生物基塑料薄膜醋酸纤维素(CA)为研究对象,通过评估改性 CA 和未改性 CA 对厌氧消化和堆肥处理工程中的影响,发现未改性 CA 的崩解率为 73.82%,改性 CA 的崩解率为 54.66%,结果表明厌氧消化有助于生物基塑料薄膜的崩解,好氧堆肥对改性 CA 崩解几乎没有效果.

表 5 影响生物可降解塑料厌氧消化降解的因素^[86-88]
Table 5 Factors affecting anaerobic digestion and degradation of biodegradable plastics^[86-88]

影响因素	实际效果	主要机理
材料性质	分子量	降低分子量提高反应初期产甲烷速率,不改变最终累积甲烷产量
	表面积	减小塑料表面积可提高降解速率、缩短反应迟滞期,但不改变最终稳定阶段生物降解率
	玻璃化温度	当环境温度高于聚合物的 T_g 时,将加快聚合物转化为甲烷的速率
	结晶度	结晶度降低有利于提高塑料的厌氧降解速率
外部环境因素	微生物	降解不同种类塑料的微生物不同;生物可降解塑料会引起微生物群落结构的改变
	C/N	合适的 C/N 比,可以有效提高降解效果
	pH 值	弱酸和偏碱性环境都有助于降解
	温度	高温显著加快塑料厌氧降解,并提高产甲烷量

微生物是厌氧消化降解生物可降解塑料的主要影响因素,但对于特定的生物可降解塑料的厌氧降解微生物尚未明确,目前只有部分生物可降解塑料拥有特异性降解微生物.其中,*Ureibaccillus* 是 PLA 的特异性降解菌属^[108],PCL 可以利用 *Clostridium* sp.在厌氧条件下降解,PHB 和 PHBV 可以通过 *Clostridium botulinum* 进行降解处理^[109].Peng 等^[110]通过评估 PBAT/PLA 共混物分别在温和热降解、与食物垃圾共消化、好氧处理三种不同条件下的降解情况,发现厌氧消化处理没有明显的生物降解.Yagi 等^[86,111-112]利用变性梯度凝胶电泳(RT-PCR DGGE)检测参与厌氧消化降解生物可降解塑料的微生物,结果表明在中温条件下 PLA 被 *Mesorhizobium* sp.和 *Xanthomonadaceae bacterium* 降解,PHB 和 PCL 被 *Arco-bacter theireius* 降解.高温条件下 PCL、PLA、PHB 同时被 *Bacillus infernus* 和 *Propionibacterium* 两种菌属降解.

厌氧消化处理 WBP 的技术工程案例是 Giovanni 等^[113]以两种热塑性醋酸纤维素基生物可降解塑料为研究对象,验证全规模工业工厂降解生物可降解塑料的能力,从而排除对工艺产出的任何负面影响.两种塑料分别在厌氧消化、堆肥、厌氧消

化联合堆肥的处理模式下进行降解处理,发现降解过程主要发生在厌氧消化期间,其中纯热塑性醋酸纤维素生物可降解塑料和复合醋酸纤维素分别实现 36%和 50%的降解,两种塑料在堆肥中降解率不足 20%,联合处理降解率要高于厌氧消化,降解率为 40%~58%,发现生物降解机理主要涉及纤维素基体的增塑剂损失和脱乙酰作用,纤维素主链仅部分降解,堆肥、厌氧消化和填料的存在都有利于降解和脱乙酰作用.表明了工业规模和实验室规模的降解有很大不同,此项工作可以帮助管理者用可持续的方式处理生物可降解塑料的新型材料.

厌氧消化是常见有机废弃物的处理方式,适合处理多种 WBP,因此处理成本也是研究的重点.Gadaleta 等^[114]以有机废物、生物可降解塑料废弃物、混合废物为研究对象,探究适合的处理方法,每种处理的碳足迹通过生命周期评估(LCA)计算,废物管理系统的总成本被用作经济参数,通过经济评估表明,有机废物、生物可降解塑料废弃物、混合废物的处理路线总成本分别为 120.35,112.21,109.43 €/t.其中厌氧消化和堆肥占总费用的 44.1%~49.4%,部分费用来自交通运输.

厌氧消化是一种非常有前景的 WBP 处理方

法^[115]。然而,厌氧消化处理 WBP 的多数研究还处于实验室规模,缺乏连续中试与工业规模处理的数据^[116]。目前,多数研究只关注 WBP 作为原料生产沼气的回收率,下一步需要更深入的探究操作条件对微生物活性的影响,以及厌氧消化过程中涉及的降解机理,从而推动厌氧消化应用于 WBP 的大规模处理。

2.4 焚烧处理

废弃生物可降解塑料都可以通过焚烧进行处理,但焚烧最适合回收难度大和回收经济效益较低的各类塑料垃圾。焚烧机理本质是焚烧过程中在无氧或近乎无氧的条件下,利用热能破坏含碳高分子化合物元素间的化学键,使含碳化合物被破坏或者进行化学重组。利用高温高压的燃烧气流将 WBP 燃烧成灰渣、废气和余热。主要是达到使 WBP 氧化分解,减容、去除毒性并回收能源的目的。

目前,多数商品塑料的热值与煤炭相当,当 WBP 可回收元素被去除后,进行能量回收也是一种经济效益较高的回收处理方法。以纤维素与淀粉为原料制备的生物可降解塑料的热值不如煤炭,但却与木材的热值相当,因此焚烧 WBP 的价值是可观的^[117-118]。但并不是所有塑料废弃物都适合焚烧处理,传统的 PVC、PET、PA 塑料热值低,并且 PVC 焚烧会产生氯气或氯化氢气体而腐蚀焚烧设备,因此不适合用于焚烧处理^[119]。生物可降解塑料焚烧方法与传统塑料焚烧方法相同,其不同之处是生物可降解塑料主链上有机碳含量比传统石油基塑料低,因此 WBP 更易充分燃烧,从而产生更少废气^[20]。

国内外研究人员为对比不同塑料焚烧的污染物排放情况,利用数据库与实验进行分析。Jang 等^[120]采用气相色谱-质谱法,对燃烧过程中排放的挥发性有机化合物进行定性与定量分析,经检测 PVC 与 PET 分别排放 $10 \times 10^{-6} \sim 115 \times 10^{-6}$ 和 $6 \times 10^{-6} \sim 22 \times 10^{-6}$ 的 VOCs,而 PHA 与 PLA 分别排放 $0.1 \times 10^{-6} \sim 0.5 \times 10^{-6}$ 和 $0.1 \times 10^{-6} \sim 1.8 \times 10^{-6}$,相比之下传统塑料比生物可降解塑料焚烧排放的 VOCs 高出 100 倍以上。虽然焚烧生物可降解塑料所排放挥发性有机化合物较少,但不是 WBP 的最佳处理方法,因为 WBP 不完全燃烧同样会排放大量的 VOCs。Zheng 等^[121]采用汇编数据的方式,统计了 10 种传统塑料与 5 种生物可降解塑料的生命周期温室气体排放结果,研究表明 2015 年全球传统塑料的温室气体排放量约为

1.7 亿 t,按照目前的排放趋势,预估到 2050 年温室气体排放量将增至约 6.5 亿 t。如果应用可再生能源、回收利用、需求管理等措施,可能会使 2050 年温室气体排放量保持在与 2015 年相当的水平。Choi 等^[122]采用生命周期评估的方式,在焚烧、填埋和回收三种不同的情况下,以 40 万片 $300 \times 250 \text{ mm}$,厚度为 0.06 mm 的薄膜为研究对象,测试了 LDPE、PLA、PLA/PBAT 共混包装膜的碳足迹,发现填埋 PLA 对减少碳排放最有效,焚烧处理 PLA/PBAT 包装膜的温室气体排放量最高。

传统塑料与生物可降解塑料进行焚烧处理都会产生有害气体,研究人员通过对焚烧技术的不断改进减少有害物质的排放,然而这些技术仍处于发展阶段。目前,虽然焚烧仍有许多缺点,但其不可或缺的优势使其具有广阔的前景与经济效益。Geng 等^[45]通过对直接焚烧的塑料进行成本分析,结果处理塑料需要 123.73 元/t,所带来的经济效益为 320.45 元,因此有必要研究清洁焚烧技术,从而消除或缓解对环境的污染^[119]。

2.5 填埋处置

填埋处置被认为是废弃物管理策略中的最后一种选择,通常将惰性或非活性的垃圾在固化稳定后进行填埋处理^[123],主要适用于难以回收处置和回收经济效益较低各类废弃塑料。填埋处置具有操作简单且不用垃圾分类与预处理等优点,因此年近 40% 的废旧塑料被运送到垃圾填埋场^[124]。与传统不可降解塑料相比,WBP 的填埋处置会在生命周期最后阶段(EOL)存在差异,传统塑料在垃圾填埋场中基本不会降解,而 WBP 在垃圾填埋场的降解水平从 0~85% 不等^[125]。

填埋处置的机理和生物处理 WBP 的机理相似,填埋处置更为复杂,他包括多种连续或并行的生化反应途径,填埋从垃圾分层填埋、覆土、封场直到稳定的整个过程,垃圾中的可降解部分在微生物的作用下,经历 4 个阶段,好氧分解阶段、厌氧分解不产甲烷阶段、厌氧分解产甲烷阶段、稳定产气阶段,最主要的是利用微生物产生的酶去攻击聚酯不稳定的酯键,从而发生解聚生成单体和低聚物,单体通过细胞膜进入细胞,最终在无氧或缺氧条件下产生 CH_4 ,在有氧条件下生 CO_2 和 H_2O ^[80-81,126]。

目前,关于 WBP 填埋处理的文献并不多,部分研

究只在实验研究阶段,主要探究 WBP 填埋对环境的危害.Ishigaki 等^[127]采用垃圾填埋场模型反应器,对聚羟基丁酸-羟基戊酸酯(PHBV)、聚己内酯(PCL)薄膜、淀粉-聚乙烯醇(SPVA)、醋酸纤维素(CA)这 4 种商用生物可降解塑料的降解性能进行探究,发现使用强制曝气提供好氧条件可能会刺激微生物的生长;PCL 无论在好氧条件还是厌氧条件下都会使薄膜破裂;PHBV 在有氧条件下会发生降解,在厌氧条件下降解不充分;曝气对于 SPVA 塑料与 CA 塑料的降解作用不大,原因可能是 SPVA 中的聚乙烯醇和 CA 塑料中的高取代 CA 抑制其降解作用.Boonmee 等^[128]在垃圾填埋场开展实验,对 PBAT、PHBV、PBS 三种生物可降解塑料在垃圾填埋场的降解进行研究,实验在 61℃ 限氧条件下进行 90d,发现 PHBV 的降解率最高,几乎被完全降解,而 PBS 的降解率是 24.04%,PBAT 降解率是 18.26%,通过对实验前后三种生物可降解塑料降解程度分析,所有材料的热稳定性与分子结构中碳含量百分比都会持续下降.Adamcova 等^[129]采用填埋处置方法,在垃圾填埋场对 HDPE 基购物袋、PE 基购物袋、纤维素过滤纸和两种可堆肥购物袋 5 种样品的降解性进行探究,发现生物降解塑料袋降解率超过 99%,而高密度聚乙烯塑料袋未被分解,只是颜色发生变化.

WBP 不适合进行填埋处置,一方面使用生物可降解塑料的初衷是减少对垃圾的填埋,WBP 进入垃圾填埋场不仅会产生更多的渗滤液与甲烷,还导致地下水、地表水与周围环境的污染^[130],另一方面,垃圾填埋场产生的甲烷需要进行回收用作能源,然而很多填埋场并没有气体收集系统,导致排放了大量的甲烷,从而加剧了全球变暖^[43].因此将 WBP 进行分类处理至关重要,以避免生物可降解塑料产品进入垃圾填埋场.关于填埋处置的价格,Baldasano 等^[131]进行了分析,为避免产生渗滤液的排放,对废旧塑料进行包裹处理,通过成本模型计算,以每年 10 万 t 处理量、使用年限 15 年、填埋深度为 20m 为条件要求,塑料处理成本约为 31.63€/t.

填埋处置 WBP 的相关技术工程的案例是 Chidambarampadmavathy 等^[132]认为生物可降解塑料同样可以通过填埋处置产生甲烷,并且再将甲烷用于生产 PHB,为了评估嗜甲烷菌生产 PHB,研究人员基于澳大利亚垃圾填埋场的废物管理进行了案

例研究.澳大利亚每年生产 48 万 t 固体废物,其中 40%被填埋,为了有效的将甲烷用于 PHB 的生产,必须考虑以下相关因素,每个填埋场平均寿命为 30 年,甲烷的收集时间为 30~50 年,甲烷的排放会因气候和年限而不同.设计完善的填埋场气体收集系统最多可收集 95%的甲烷.使用约 1.13g 的甲烷可以产生 0.5~0.6g 的 PHB,对于平均每年处置 5000t 的小型垃圾填埋场,每年可回收 163t 甲烷,使用相应的模型计算,最终能够可以产生 71t 的 PHB.并且利用甲烷作为碳源合成 PHB 的工艺,按每年生产 500t 的 PHB 工厂计算,生产 1kg 的 PHB 成本约为 10.5A.

2.6 生物可降解塑料的升级回收

WBP 可以通过完全矿化解决环境污染问题,但是会造成资源的极大浪费^[133],并且随着生物可降解塑料市场的扩大,WBP 的量越来越大,因此有必要探究更加高效、环保、便捷的回收方法,从而为实现循环经济与可持续发展目标提供参考^[134].

传统塑料可以通过升级回收进行资源循环利用,WBP 也可采用升级回收,通过酶与微生物可以实现 WBP 的生物技术再生与再利用.Ellis 等^[135]采用生物技术,提出利用塑料废弃物为基质,生产新的聚合物或附加值产品,但是此回收技术仍还处于发展阶段.目前,国内外研究人员对生物可降解塑料的升级回收可以利用微生物与催化剂完成.GARCÍA 等^[136]采用热化学与微生物相结合的方法,对 PLA 进行升级回收,将 PLA 进行碱性热水解处理后,利用工程 E.coli 菌株 DC1001 获得光学纯度等于或高于 99%的乳酸发酵液.Lee 等^[137]利用贝壳废料(SSC)为催化剂,将其用于生物可降解秸秆(BDS)的热催化转化,实现回收生物可降解塑料单体,结果表明 SSC/BDS 质量比为 0.5 时,BDS 的乳酸回收率最高,使用 SSC 为催化剂时,乳酸回收率比非催化的 BDS 转化率高 130 倍.Eang 等^[138]以 PLA 的化学回收产物为添加剂,开发出具有超疏水性能的聚乳酸基纳米纤维,该材料表现出较高的油水分离性能,并且可以重复使用 10 次以上,从而实现 PLA 的升级利用.Xie 等^[139]利用新型催化剂四甲基氟化铵(TMAF),催化 PLA 的选择性甲醇分解制备乳酸甲酯(ML),其性能稳定并且产率较高.Thakur 等^[140]采用熔融纺丝法,对 PLA 废塑料进行熔融回收制备生物降解聚乳酸纤维,其产物在结构性能、力学性能、热性能等方

面都有较好的表现。

为了进一步降低 WBP 的回收成本,研究人员开发了简单的升级回收工艺流程.Shao 等^[141]提出关于 PLA 升级回收的路径,可以将 PLA 废料在 48h 内转化为新的 3D 打印材料,PLA 的酯键通过氨解进行断裂,得到的单体化合物用甲基丙烯酸酐衍生化,引入双键并由此获得可交联单体,之后与共聚物和引发剂结合,可以生产光固化树脂,从而将其用于 3D 打印机.Pantelic 等^[142]采用生物转化的方法,以生物可降解聚乙烯醇/热塑性淀粉(PVA/TPS)食品包装膜为原料,利用 *Ralstonia eutropha* H16、链霉菌属 JS520、枯草芽孢杆菌 ATCC6633 三种生物,将 PVA/TPS 转化为高市场价值的生物色素与聚羟基丁酸酯(PHB),这种低能耗、低碳的 PVA/TPS 再生循环模式,推动了生物可降解塑料循环利用的进展.Abu-thabit 等^[143]采用两步法,以塑料和木质纤维素废料为原料生产 PHA.第一步,将 PE、PP、PS、PET、木质纤维素大分子解聚并转化为更小的单体.第二步,将这些单体用于后续的生物升级循环,通过发酵过程生产 PHA,此种处理方法降低了 PHA 的生产成本,并有助于解决塑料污染的问题。

Roux 等^[144]利用废弃 PET 升级回收制备聚呋喃甲酸乙二醇酯(PEF)和聚对苯二甲酸丙二醇酯(PTT),通过 SuperPro Designer 软件中开发了 3 种废物进料中生产 PEF 和 PTT 的工艺,并通过贴现累积现金流(DCCF)分析评估了其经济可行性,结果通过该工艺生产的 PEF 和 PTT 最低售价为每公斤 3.13 \$,3 种工艺的回收率分别为 42%、50%和 55%,并且还表明,增加回收可以将生物可降解塑料的最低价格降至 1.61\$/kg。

2.7 自然条件下生物可降解塑料的降解

传统的聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚氯乙烯(PVC)等塑料在自然环境中难以分解,对环境造成污染.而生物可降解塑料在自然环境中的降解过程主要涉及生物降解、光解和化学降解,这 3 种降解方式是同时存在且相互协同的,生物降解通常发生在光降解之后。

在自然条件下 WBP 的降解主要包括 4 个步骤,(1)自然环境的光照和风化使塑料碎片化,降低聚合物的分子量,这种现象也被称为聚合物的老化分解.(2)生物劣化,微生物在聚合物的表面或内部

生长使聚合物的机械、化学和物理性能发生改变.(3)生物裂解,通过微生物的作用将聚合物转化为低聚物和单体.(4)同化,微生物从聚合物的裂解中获得所需的碳、能量和营养源,并将塑料中的碳转化为 CO₂ 和 CH₄ 等产物^[145].影响 WBP 在自然环境中降解的因素包括化学结构、结晶度、聚合物链等,通常链较短、无定形部分较多、聚合物的原料简单等更容易被微生物降解,此外,WBP 所处的环境也是生物降解的关键因素,主要包括 pH 值、温度、水分、含氧量等^[146]。

自然土壤环境中含有大量的微生物,这使得 WBP 的降解效果更好.Rudnik 等^[147]对 PLA 在真实土壤环境中的生物降解进行 11 个月实验研究,发现对照组的纤维素被完全降解,PLA 也在一定程度上发生部分分解,降解过程与实际条件下的温度和实验持续的时间有密切关系.Boyandin 等^[148]对 PHA 薄膜在土壤环境中的降解进行研究,发现发挥降解作用的主要是伯克霍尔德菌属、芽孢杆菌属、铜分枝杆菌属、诺卡菌属等为代表的细菌以及顶孢菌属、贡氏菌属、拟青霉属、青霉属、木霉属等,并且降解程度与 pH 值有关,在合适的土壤环境中 PHA 超过 98%被降解.海洋和水生系统中同样存在大量的塑料垃圾,造成水环境的污染,从而对水生动植物造成危害.WBP 是环境中可被微生物降解的聚合物,Maurizio 等^[149]为了解在海洋中的降解情况,对 6 处不同位置中的 WBP 进行实验,发现与富营养化的环境相比,海洋中上层位置处的降解效率最高,并且在水和沉积物的界面处也可以实现生物可降解塑料的降解.Thellen 等^[150]为了比较 WBP 在实验条件下和实际海洋环境中的降解情况,对 PHB 和 PHBV 在静态和动态条件下的海水中生物降解进行实验,发现两种静态和动态环境中失重率相同,但是动态条件下的失重比静态条件下要小,这是因为动态环境中海水温度不断变化以及营养供应受限。

生物可降解塑料的成本高于传统塑料,并且生物可降解塑料通常用作一次性材料,WBP 利用环境的微生物进行降解,不仅造成资源的浪费同时会造成碳排放.因此,对于易于回收的 WBP 尽量采取回收措施.常见不同处理方法适用的生物可降解塑料种类如表 6 所示^[151]。

表 6 不同处理方法适用的生物可降解塑料种类^[151,155-156]

Table 6 Different treatment methods suitable for various biodegradable plastics^[151,155-156]

处理方法	生物可降解塑料的种类	具体可处理的塑料
机械回收	热塑性塑料为主,可以被重新熔融处理回收,热固性塑料不适合机械回收	PLA、PBAT、PCL 等一系列热塑性塑料
醇解	生物基生物可降解塑料和石油基非生物可降解塑料	PLA、PET、PHB、PHBV
水解	主要适合结晶度低的生物可降解塑料	PLA、PBAT
酶促降解	结晶度低的生物可降解塑料	PHB、PBS、PBAT、PLA
还原解聚	生物基生物可降解塑料	PCL、PLA、PBT
糖醇解	石油基塑料	PET
堆肥	结晶度低的生物可降解塑料	PLA、PBAT、PHA、PCL 和淀粉基生物可降解塑料
厌氧消化	结晶度低的生物可降解塑料	PHB、PBS、PBAT、PLA
焚烧处理	所有种类的塑料都可以焚烧处理,更适合难回收、难处理、回收价值低的塑料	—
填埋处置	所有种类的塑料都可以填埋处理,更适合没有利用价值的塑料废弃物	—
升级回收	适用于回收质量高的塑料制品或价值较高的塑料	PLA、PHA
自然降解	不易回收或回收价值低的生物可降解塑料	—

2.8 废弃生物可降解塑料处理方法的发展趋势

目前,WBP 的处理方法都有局限性,传统的焚烧与填埋处理对环境危害较大,已经被越来越多的国家淘汰^[119].基于已有的研究,对当前处理方法的优缺点对比分析如表 7 所示^[152].并非所有的 WBP 都可以被降解,每种生物可降解塑料都有独特的加工条件与性质,因此不能使用通用的废弃物管理方案进行处理^[153].WBP 还具有异质性、低市场量、来源广泛等特点,使其在处理上难度加大^[154].

欧洲许多国家主要通过机械回收和堆肥的方

法处理 WBP.这些国家的废弃物管理系统主要包括:源分离、收集、运输、分类、再利用、再循环、能源回收、处理和处置^[159].与传统塑料相同,不同类型的生物可降解塑料需要单独回收,在建立完善的特定塑料类型回收流的情况下,生物可降解塑料可以与传统塑料一起回收.目前,欧洲废弃物处理等级中排名较高的处理方法是堆肥,当传统塑料与 WBP 混合时,机械回收的成本较高,而通过堆肥可以避免 WBP 进入焚烧或垃圾填埋场,并且可以促进其单独收集,从而获得更有价值的堆肥产品^[160].

表 7 不同生物可降解塑料处理方法的优缺点比较^[152,157-158]

Table 7 Comparison of advantages and disadvantages of treatment methods for different biodegradable plastics^[152,157-158]

项目	机械回收	化学回收	生物处理	填埋	焚烧	升级回收	自然降解
是否减少对原料的需求	是,如果是闭环过程	是,如果是闭环过程	是	否	否	是	否
是否需要对废弃物进行分类	是	是	是	否	否	是	否
是否适合所有塑料类型	否,热塑性塑料可以循环利用因为其可被重新熔化,而热固性塑料不能	否	否	是	是	否	是
是否可以能量回收	否,但物质是守恒的	否,但物质是守恒的	否	塑料除外	是	否	否
基础设施的空间需要	低	低	需要一定空间	需要越来越多的空间	低	低	否
流程复杂性	相对简单	复杂	相对复杂	工艺简单	工艺简单	复杂	简单
污染风险	低	低	低	长期存在土壤与地下水污染的风险	操作不当有害灰分会带来健康与污染风险	低	严重危害环境
花费	启动成本高	启动和流程期间花费高	成本低	低成本	启动成本高	启动和流程期间花费高	无

目前,国内对 WBP 的处理方法的研究报道并不多见,结合我国的国情与政策导向趋势,未来生物可

降解塑料势必在国内大规模推广应用.大量的 WBP 会使后续处理的压力骤增,而单一的处理方法存在诸多弊端,因此需要采用多种方法协同处理.将机械回收、化学回收、升级回收、堆肥、焚烧以上处理设施集中在恰当的处理地区,以便于 WBP 的运输和集中处理.首先,机械回收操作简单,可将塑料进行分类.清洁的塑料可以熔融后循环使用,也可以通过化学回收和升级回收的方法进行原料回收,从而实现资源的高效循环利用.其次,针对分选后不易重复利用

的 WBP,采用堆肥的方法处理,其产物可供植物生长,而植物可以提取纤维素、糖类、淀粉、油类等作为制备生物可降解塑料的原料.最后,对于难分离且不易回收的 WBP 进行焚烧发电,实现能源的回收.此流程主要通过快速的 WBP 分类系统,将 WBP 分为清洁塑料、不易重复使用塑料、难以分离塑料,可以快速精准的确定处理方法,将以上几种回收方法相结合,从而实现 WBP 的绿色处理与资源的高效再生循环(图 3).

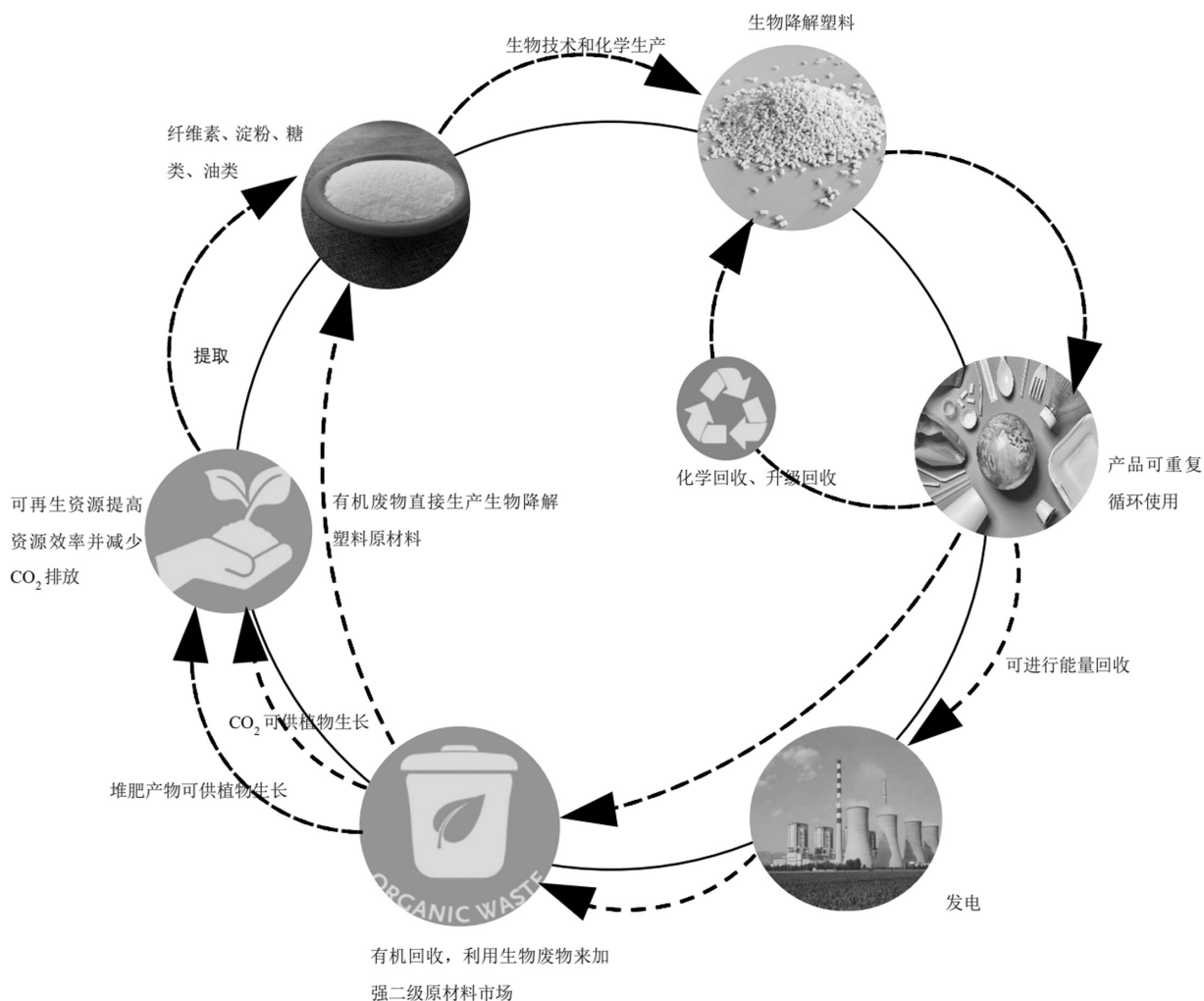


图 3 生物可降解塑料的处理方法与运行模式

Fig.3 Operation model and treatment methods of biodegradable plastics

将回收的 WBP 经过处理后生成应用价值更高的产品一直是研究的难点,并非所有的生物可降解塑料都可以实现经济回收,并且回收过程中会消耗能源,排放污染物,大部分 WBP 再生产品质量较差,因此只能降低应用场景.目前,多数 WBP 处理技术仍处于实验室研究阶段,不能大规模推

广应用.针对 WBP 的处理还需进一步的研究与探索,同时将 WBP 管理与其它措施相结合,改进生物可降解塑料的生产过程,创造生命周期更长的产品,从而形成完善且系统的 WBP 处理流程,对生物可降解塑料产业的绿色发展和生态环境保护都有重要意义.

3 总结

随着近年来国内外关于生物可降解塑料政策的逐步完善,公众环保意识的提高,生物可降解塑料的市场需求不断扩大,其产能逐年提高,并且广泛应用于农业、医疗、包装、汽车等领域。高产量的生物可降解塑料必然会导致大量 WBP 的产生。为避免 WBP 对环境造成危害,研究人员相继研发出机械回收处理、化学处理、生物处理、焚烧、填埋、升级回收处理等多种处理方法,为 WBP 的绿色处理与资源化利用提供了思路和参考。

目前,传统塑料的处理方法相对成熟且应用广泛,但 WBP 的处理研究相对较少,多数处于实验室研究阶段,没有投入实际生产。WBP 处理面临的问题与困难包括:(1)回收原料中包含多种塑料废弃物与杂质,需要对其进行分选和杂质的去除,使得处理成本升高。(2)多次机械回收的塑料性能会有所下降,需要添加有机填料或扩链剂进行改善,或者利用性能互补的塑料进行混合提高产品性能。(3)焚烧与填埋对环境危害较大,需要更环保、绿色、经济、可循环的处理技术。(4)升级回收的局限性是只能针对部分塑料进行处理,并且运行成本较高。对于 WBP,目前尚未形成完整且系统的处理流程,因此需要将多种回收处理方法进行结合,快速精准地确定 WBP 的处理方法,从而实现 WBP 的资源化利用。

参考文献:

- [1] 侯冠一,翁云宣,刁晓倩,等.生物降解塑料产业现状与未来发展 [J]. 中国材料进展, 2022,41(1):52-67.
- [2] Hou G Y, Weng Y X, Diao X Q, et al. The current development situation and future development of biodegradable plastic industry [J]. Materials China, 2022,41(1):52-67.
- [3] Patel G B, Singh N L, Singh F. Modification of chitosan-based biodegradable polymer by irradiation with MeV ions for electrolyte applications [J]. Materials Science and Engineering B-Advanced Functional Solid-State Materials, 2017,225:150-159.
- [4] Hou G, Weng Y, Diao X, et al. The current development situation and future development of biodegradable plastic industry [J]. Materials China, 2022,41(1):52-67.
- [5] Proceedings of the international conference on sustainable design and manufacturing [C]. Split: Springer, 2021.
- [6] Arman Alim A A, Mohammad Shirajuddin S S, Anuar F H. A review of nonbiodegradable and biodegradable composites for food packaging application [J]. Journal of Chemistry, 2022,197:177-198.
- [7] Coltelli M-B, Danti S, DE Clerck K, et al. Pullulan for advanced sustainable body-and skin-contact applications [J]. Journal of Functional Biomaterials, 2020,11(1):20.
- [8] Mo A, Zhang Y, Gao W, et al. Environmental fate and impacts of biodegradable plastics in agricultural soil ecosystems [J]. Applied Soil Ecology, 2023,181:104667.
- [9] Kalia V C, Patel S K S, Shanmugam R, et al. Polyhydroxyalkanoates: Trends and advances toward biotechnological applications [J]. Bioresource Technology, 2021,326:124737.
- [10] Čolnik M, Knez-hrnčič M, Škerget M, et al. Biodegradable polymers, current trends of research and their applications, a review [J]. Chemical Industry, 2020,26(4):401-418.
- [11] Diao X, Weng Y, Song X, et al. Current development situation of biodegradable plastic industry In China and abroad [J]. China Plastics, 2020,34(5):123-135.
- [12] Rai P, Mehrotra S, Priya S, et al. Recent advances in the sustainable design and applications of biodegradable polymers [J]. Bioresource Technology, 2021,325:124739.
- [13] Meghana M C, Nandhini C, Benny L, et al. A road map on synthetic strategies and applications of biodegradable polymers [J]. Polymer Bulletin, 2022:1-50.
- [14] Mtibe A, Motloung M P, Bandyopadhyay J, et al. Synthetic biopolymers and their composites: Advantages and limitations—an overview [J]. Macromolecular Rapid Communications, 2021,42(15):2100130.
- [15] Sun C, Wei S, Tan H, et al. Progress in upcycling polylactic acid waste as an alternative carbon source: A review [J]. 2022,446(1):136881.
- [16] Alaerts L, Augustinus M, Van Acker K. Impact of bio-based plastics on current recycling of plastics [J]. Sustainability, 2018,10(5):1487.
- [17] Gioia C, Giacobazzi G, Vannini M, et al. End of Life of Biodegradable Plastics: Composting versus Re/Upcycling GT1 [J]. Chemsuschem, 2021,14(19):4167-4175.
- [18] 刁晓倩,翁云宣,付 焱,等.生物降解塑料应用及性能评价方法综述 [J]. 中国塑料, 2021,35(8):152-161.
- [19] Diao X Q, Weng Y X, Fu Y, et al. Review of applications and performance evaluation methods of biodegradable plastics [J]. China Plastics 2021,35(8):152-161.
- [20] Bano K, Kuddus M, R Zaheer M, et al. Microbial enzymatic degradation of biodegradable plastics [J]. Current pharmaceutical biotechnology, 2017,18(5):429-440.
- [21] Vu D H, Åkesson D, Taherzadeh M J, et al. Recycling strategies for polyhydroxyalkanoate-based waste materials: An overview [J]. Bioresource technology, 2020,298:122393.
- [22] Saalah S, Saallah S, Rajin M, et al. Management of biodegradable plastic waste: A review [J]. Advances in Waste Processing Technology, 2020:127-143.
- [23] Mtibe A, Motloung M P, Bandyopadhyay J, et al. Synthetic biopolymers and their composites: Advantages and limitations—An overview [J]. 2021,42(15):2100130.
- [24] 王华林,盛敏刚,史铁钧,等. PLA 及 PLA 复合材料降解性能研究进展 [J]. 高分子材料科学与工程, 2004,(6):20-23.
- [25] Wang H L, Sheng M G, Shi T J, et al. Advance in the studies on degradation of PLA and PLA composites [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021,42(15):2100130.

- [23] Tan G Y A, Chen C L, Li L, et al. Start a research on biopolymer polyhydroxyalkanoate (PHA): A review [J]. *Polymers*, 2014,6(3): 706–754.
- [24] Aversa C, Barletta M, Cappiello G, et al. Compatibilization strategies and analysis of morphological features of poly (butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)/poly(lactic acid) PLA blends: A state-of-art review [J]. *European Polymer Journal*, 2022,173:111304.
- [25] Hu X, Mao H, Su T, et al. Advances in biodegradation of polybutylene succinate (PBS) [J]. *Journal of Microbiology*, 2016,36(4):84–89.
- [26] Tan B, Sun Z, Ji Y. A review in synthesis and modification of poly(glycolic acid) [J]. *China Plastics*, 2021,35(10):137–146.
- [27] Kumar R, Sadeghi K, Jang J, et al. Mechanical, chemical, and bio-recycling of biodegradable plastics: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2023,882:163446.
- [28] Vu D H, Åkesson D, Taherzadeh M J, et al. Recycling strategies for polyhydroxyalkanoate-based waste materials: An overview [J]. 2020,298:122393.
- [29] Leibfarth F A, Moreno N, Hawker A P, et al. Transforming polylactide into value - added materials [J]. 2012,50(23):4814–4822.
- [30] Wojnowska-Bąryła I, Kulikowska D, Bernat K. Effect of bio-based products on waste management [J]. *Sustainability*, 2020,12(5):2088.
- [31] Beltrán F, Barrio I, Lorenzo V, et al. Valorization of poly (lactic acid) wastes via mechanical recycling: Improvement of the properties of the recycled polymer [J]. *Waste Management*, 2019,37(2):135–141.
- [32] Kawashima N, Yagi T, Kojima K, et al. How do bioplastics and fossil - based plastics play in a circular economy? [J]. *Macromolecular materials*, 2019,304(9):1900383.
- [33] 吴仲伟,刘志峰,刘光复,等.基于机械物理法的热固性塑料粉碎及再生机理研究 [J]. *中国机械工程*, 2012,23(14):1639–1644.
- Wu Z W, Liu Z F, Liu G F, et al. Research on crushing and regeneration mechanism of thermosetting plastic based on mechanical and physical method [J]. *China Mechanical Engineering*, 2012,23(14): 1639–1644.
- [34] Schyns Z O, Shaver M P J M R C. Mechanical recycling of packaging plastics: A review [J]. 2021,42(3):2000415.
- [35] Briassoulis D, Pikasi A, Hiskakis M. Recirculation potential of post-consumer/industrial bio-based plastics through mechanical recycling-Techno-economic sustainability criteria and indicators [J]. *Polymer Degradation*, 2021,183:109217.
- [36] Al-salem S, Lettieri P, Baeyens J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review [J]. *Waste management*, 2009, 29(10):2625–2643.
- [37] Rivas L F, Casarin S A, Nepomuceno N C, et al. Reprocessability of PHB in extrusion: ATR-FTIR, tensile tests and thermal studies [J]. *Polímeros*, 2017,27:122–128.
- [38] Aldas M, Pavon C, DE LA ROSA-RAMIREZ H, et al. The impact of biodegradable plastics in the properties of recycled polyethylene terephthalate [J]. *Journal of Polymers*, 2021,29(8):2686–2700.
- [39] Vu D H, Åkesson D, Taherzadeh M J, et al. Recycling strategies for polyhydroxyalkanoate-based waste materials: An overview [J]. *Bioresource technology*, 2020,298:122393.
- [40] Marinho V A, Pereira C A, Vitorino M B, et al. Degradation and recovery in poly (butylene adipate-co-terephthalate)/thermoplastic starch blends [J]. *Polymer Testing*, 2017,58:166–172.
- [41] Beltrán F R, Gaspar G, Dadras Chomachayi M, et al. Influence of addition of organic fillers on the properties of mechanically recycled PLA [J]. *Environmental Science Pollution Research*, 2021,28(19): 24291–24304.
- [42] Beltrán F R, Infante C, De La Orden M U, et al. Mechanical recycling of poly (lactic acid): Evaluation of a chain extender and a peroxide as additives for upgrading the recycled plastic [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,219:46–56.
- [43] Rujnić-Sokele M, Pilipović A, Research. Challenges and opportunities of biodegradable plastics: A mini review [J]. *Waste Management*, 2017,35(2):132–140.
- [44] Chen X Z, Kroell N, Li K, et al. Influences of bioplastic polylactic acid on near-infrared-based sorting of conventional plastic [J]. *Waste Management & Research*, 2021,39(9):1210–1213.
- [45] Geng X M, Song N, Zhao Y C, et al. Waste plastic resource recovery from landfilled refuse: A novel waterless cleaning method and its cost-benefit analysis [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022,306:114462.
- [46] Soroudi A, Jakubowicz I J E P J. Recycling of bioplastics, their blends and biocomposites: A review [J]. 2013,49(10):2839–2358.
- [47] Siddiqui M N, Redhwi H H, Al-Arfaj A A, et al. Chemical recycling of pet in the presence of the bio-based polymers, pla, phb and pef: A review [J]. *Sustainability*, 2021,13(19):10528.
- [48] Sánchez A C, Collinson S R. The selective recycling of mixed plastic waste of polylactic acid and polyethylene terephthalate by control of process conditions [J]. *European Polymer Journal*, 2011,47(10):1970–1976.
- [49] 黄 婕,陈 磊,齐文杰,等.聚酯在超临界甲醇中的降解特性 [J]. *功能高分子学报*, 2007,7(1):53–59.
- Huang J, Chen L, Qi W J, et al. Degradation behaviors of polyesters in supercritical meyhanol [J]. *Journal of Functional Polymers*, 2007,7(1):53–59.
- [50] Román-Ramírez L A, Mckeown P, Jones M D, et al. Poly (lactic acid) degradation into methyl lactate catalyzed by a well-defined Zn (II) complex [J]. *ACS Catalysis*, 2018,9(1):409–416.
- [51] Gioia C, Giacobazzi G, Vannini M, et al. End of life of biodegradable plastics: composting versus Re/upcycling [J]. *ChemSusChem*, 2021, 14(19):4167–4175.
- [52] Leibfarth F A, Moreno N, Hawker A P, et al. Transforming polylactide into value - added materials [J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2012,50(23):4814–4822.
- [53] Liu H, Song X, Liu F, et al. Ferric chloride as an efficient and reusable catalyst for methanolysis of poly (lactic acid) waste [J]. *Journal of Polymer Research*, 2015,22(7):1–7.
- [54] Xie S Q, Sun Z R, Liu T, et al. Beyond biodegradation: Chemical upcycling of poly(lactic acid) plastic waste to methyl lactate catalyzed by quaternary ammonium fluoride [J]. *Journal of Catalysis*, 2021, 402:61–71.
- [55] Nim B, Opaprakasit P, Spectroscopy B. Quantitative analyses of products from chemical recycling of polylactide (PLA) by alcoholysis with various alcohols and their applications as healable lactide-based polyurethanes [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular*, 2021,

- 255:119684.
- [56] Lamberti F M, Ingram A, Wood J. Synergistic dual catalytic system and kinetics for the alcoholysis of poly (lactic acid) [J]. *Processes*, 2021,9(6):921.
- [57] Okajima I, Watanabe K, Haramiishi S, et al. Recycling of carbon fiber reinforced plastic containing amine-cured epoxy resin using supercritical and subcritical fluids [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2017,119:44–51.
- [58] Kasirajan S, Ngouajio M. Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013,33(2):501–529.
- [59] 金 琰,蔡凡凡,王立功,等.生物可降解塑料在不同环境条件下的降解研究进展 [J]. *生物工程学报*, 2022,38(5):1784–1808.
- Jin Y, Cai Y Y, Wang L G, et al. Advance in the degradation of biodegradable plastics in different environments [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2022,38(5):1784–1808.
- [60] Tobias H, Carolin V L, Johanna K, et al. Plastics of the future? The impact of biodegradable polymers on the environment and on society [J]. *Angewandte Chemie*, 2018,58(1):50–62.
- [61] Yagihashi M, Funazukuri T, Research E C. Recovery of L-lactic acid from poly (L-lactic acid) under hydrothermal conditions of dilute aqueous sodium hydroxide solution [J]. *Industrial*, 2010,49(3):1247–1251.
- [62] Lai J, Huang H, Lin M, et al. Enzyme catalyzes ester bond synthesis and hydrolysis: The key step for sustainable usage of plastics [J]. *Frontiers in microbiology*, 2022,13:1113705.
- [63] Zhang J, Zhu J, Hua Z, et al. Specific Ion Effects on the Enzymatic Degradation of Polyester Films [J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2023,41(4):476–482.
- [64] Bi S, Tan B, Soule J L, et al. Enzymatic degradation of poly (butylene succinate-co-hexamethylene succinate) [J]. *Polymer Degradation*, 2018,155:9–14.
- [65] Feghali E, Tauk L, Ortiz P, et al. Catalytic chemical recycling of biodegradable polyesters [J]. *Polymer Degradation Stability*, 2020, 179:109241.
- [66] Sukkhum S, Tokuyama S, Kitpreechavanich V, et al. Poly (L-lactide)-degrading enzyme production by *Actinomyces keratinilytica* T16-1 in 3L airlift bioreactor and its degradation ability for biological recycle [J]. *Journal of microbiology*, 2012,22(1):92–99.
- [67] Wei X F, Capezza A J, Cui Y, et al. Millions of microplastics released from a biodegradable polymer during biodegradation/enzymatic hydrolysis [J]. *Water Research*, 2022,211:118068.
- [68] Feghali E, Tauk L, Ortiz P, et al. Catalytic chemical recycling of biodegradable polyesters [J]. *Polymer Degradation*, 2020,179:109241.
- [69] Feghali E, Cantat T. Room temperature organocatalyzed reductive depolymerization of waste polyethers, polyesters, and polycarbonates [J]. *ChemSusChem*, 2015,8(6):980–984.
- [70] Fernandes A C. Reductive depolymerization of plastic waste catalyzed by Zn (OAc)₂·2H₂O [J]. *ChemSusChem*, 2021,14(19):4228–4233.
- [71] Alberti C, Eckelt S, Enthaler S J C. Ruthenium-Catalyzed Hydrogenative Depolymerization of End-of-Life Poly (bisphenol A carbonate) [J]. *Chemistry Select*, 2019,4(42):12268–12271.
- [72] Siddiqui M N, Redhwi H H, Al-arfaj A A, et al. Chemical recycling of pet in the presence of the bio-based polymers, pla, phb and pef: A review [J]. *Sustainability*, 2021,13(19):10528.
- [73] Lamberti F M, Roman-Ramirez L A, WOOD J. Recycling of Bioplastics: Routes and Benefits [J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2020,28(10):2551–2571.
- [74] Al-Sabagh A M, Yehia F Z, Eissa A-M M, et al. Glycolysis of poly (ethylene terephthalate) catalyzed by the Lewis base ionic liquid [Bmim] [OAc] [J]. *Industrial*, 2014,53(48):18443–18451.
- [75] Ghasemi M H, Neekzad N, Ajdari F B, et al. Mechanistic aspects of poly(ethylene terephthalate) recycling-toward enabling high quality sustainability decisions in waste management [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021,28:43074–43101.
- [76] De Castro A M, Carniel A. A novel process for poly (ethylene terephthalate) depolymerization via enzyme-catalyzed glycolysis [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2017,124:64–68.
- [77] Zheng Y, Yuan Q, Luo H, et al. Engineering NOG-pathway in *Escherichia coli* for poly-(3-hydroxybutyrate) production from low cost carbon sources [J]. *Bioengineered*, 2018,9(1):209–213.
- [78] Chandrasekaran S R, Sharma B K. Fuel properties associated with catalytic conversion of plastics [M]. *Plastics to Energy*. Elsevier. 2019:173–220.
- [79] Razza F, Innocenti F D. Bioplastics from renewable resources: the benefits of biodegradability [J]. *Asia - Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2012,7:S301–S309.
- [80] Al-Itry R, Lamnawar K, Maazouz A J P D, et al. Improvement of thermal stability, rheological and mechanical properties of PLA, PBAT and their blends by reactive extrusion with functionalized epoxy [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2012,97(10):1898–1914.
- [81] 金 琰,蔡凡凡,王立功,等.生物可降解塑料在不同环境条件下的降解研究进展 [J]. *生物工程学报*, 2022,38(5):1784–808.
- Jin Y, Cai Y Y, Wang L G, et al. Advance in the degradation of biodegradable plastics in different environments [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2022,38(5):1784–1808.
- [82] Havstad M R. Biodegradable plastics [M]. *Croatia: Plastic waste and recycling*, 2020:97–129.
- [83] Mergaert J, Schirmer A, Hauben L, et al. Isolation and identification of poly (3-hydroxyvalerate)-degrading strains of *Pseudomonas lemoignei* [J]. *Microbiology Society*, 1996,46(3):769–773.
- [84] Satti S M, Abbasi A M, Marsh T L, et al. Statistical optimization of lipase production from *Sphingobacterium* sp. strain S2 and evaluation of enzymatic depolymerization of poly (lactic acid) at mesophilic temperature [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2019,160:1–13.
- [85] Abou-Zeid D-M, Müller R-J, Deckwer W-D J J O B. Degradation of natural and synthetic polyesters under anaerobic conditions [J]. *Journal of Biotechnology*, 2001,86(2):113–126.
- [86] 聂 榕,彭 伟,吕 凡,等.生物可降解塑料厌氧消化降解研究进展 [J]. *环境卫生工程*, 2023,31(2):46–56.
- Nie R, Peng W, Lv F, et al. Research progress on degradation of biodegradable plastics during anaerobic digestion. [J]. *Environment Sanitation Engineering*, 2023,31(2):46–56.
- [87] Cazaudehore G, Guyoneaud R, Evon P, et al. Can anaerobic digestion be a suitable end-of-life scenario for biodegradable plastics? A critical review of the current situation, hurdles, and challenges [J]. *Chemistry*

- Select, 2022:107916.
- [88] Garcia-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 Advances*, 2021,53:107772.
- [89] Luyt A S. Can Biodegradable Plastics Solve Plastic Solid Waste Accumulation? [J]. *Plastics to Energy*, 2019:403–423.
- [90] Emadian S M, Onay T T, Demirel B. Biodegradation of bioplastics in natural environments [J]. *Waste Management*, 2017,59:526–536.
- [91] Artham T, Doble M. Biodegradation of aliphatic and aromatic polycarbonates [J]. *Macromolecular Bioscience*, 2008,8(1):14–24.
- [92] Satti S M, Abbasi A M, Salahuddin, et al. Statistical optimization of lipase production from *Sphingobacterium* sp. strain S2 and evaluation of enzymatic depolymerization of Poly(lactic acid) at mesophilic temperature [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2019,160:1–13.
- [93] Sakai K, Kawano H, Iwami A, et al. Isolation of a thermophilic poly-L-lactide degrading bacterium from compost and its enzymatic characterization [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2001,92(3):298–300.
- [94] Hu X P, Thumarat U, Zhang X, et al. Diversity of polyester-degrading bacteria in compost and molecular analysis of a thermoactive esterase from *Thermobifida alba* AHK119 [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010,87(2):771–779.
- [95] Akbar S, Hasan F, Nadhman A, et al. Production and Purification of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) Degrading Enzyme from *Streptomyces* sp AF-111 [J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2013,21(4):1109–1116.
- [96] Sintim H Y, Bary A I, Hayes D G, et al. In situ degradation of biodegradable plastic mulch films in compost and agricultural soils [J]. *Science of the total environment*, 2020,727:138668.
- [97] Markowicz F, Szymańska-Pulikowska A. Analysis of the possibility of environmental pollution by composted biodegradable and oxo-biodegradable plastics [J]. *Geosciences*, 2019,9(11):460.
- [98] Anstey A, Muniyasamy S, Reddy M M, et al. Processability and biodegradability evaluation of composites from poly (butylene succinate)(PBS) bioplastic and biofuel co-products from Ontario [J]. *Journal of Polymers*, 2014,22(2):209–218.
- [99] Sarasa J, Gracia J M, Javierre C. Study of the biodegradation of a bioplastic material waste [J]. *Bioresource technology*, 2009,100(15):3764–3768.
- [100] Siracusa V. Microbial degradation of synthetic biopolymers waste [J]. *Polymers*, 2019,11(6):1066.
- [101] Kooduvalli K, Vaidya U K, Ozcan S. Life cycle assessment of compostable coffee pods: A US university based case study [J]. *Scientific Reports*, 2020,10(1):1–24.
- [102] Weng Y X, Wang Y, Wang X L, et al. Biodegradation behavior of PHBV films in a pilot-scale composting condition [J]. *Polymer Testing*, 2010,29(5):579–587.
- [103] Folino A, Karageorgiou A, Calabrò P S, et al. Biodegradation of wasted bioplastics in natural and industrial environments: A review [J]. *Sustainability*, 2020,12(15):6030.
- [104] Tokiwa Y, Calabia B P, Ugwu C U, et al. Biodegradability of plastics [J]. *Molecular Sciences*, 2009,10(9):3722–3742.
- [105] Cazaudehore G, Guyoneaud R, Evon P, et al. Can anaerobic digestion be a suitable end-of-life scenario for biodegradable plastics? A critical review of the current situation, hurdles, and challenges [J]. *Biotechnology Advances*, 2022,56:107916.
- [106] Jin Y, Cai F F, Song C, et al. Degradation of biodegradable plastics by anaerobic digestion: Morphological, micro-structural changes and microbial community dynamics [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,834:155167.
- [107] Gadaleta G, De Gisi S, Picuno C, et al. The influence of bio-plastics for food packaging on combined anaerobic digestion and composting treatment of organic municipal waste [J]. *Waste Management*, 2022,144:87–97.
- [108] Yagi H, Ninomiya F, Funabashi M, et al. Mesophilic anaerobic biodegradation test and analysis of eubacteria and archaea involved in anaerobic biodegradation of four specified biodegradable polyesters [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2014,110:278–283.
- [109] Abou-Zeid D M, Muller R J, Deckwer W D. Degradation of natural and synthetic polyesters under anaerobic conditions [J]. *Journal of Biotechnology*, 2001,86(2):113–126.
- [110] Peng W, Wang Z J, Shu Y H, et al. Fate of a biobased polymer via high-solid anaerobic co-digestion with food waste and following aerobic treatment: Insights on changes of polymer physicochemical properties and the role of microbial and fungal communities [J]. *Bioresource Technology*, 2022,343:126079.
- [111] Yagi H, Ninomiya F, Funabashi M, et al. Mesophilic anaerobic biodegradation test and analysis of eubacteria and archaea involved in anaerobic biodegradation of four specified biodegradable polyesters [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2014,110:278–283.
- [112] Yagi H, Ninomiya F, Funabashi M, et al. Thermophilic anaerobic biodegradation test and analysis of eubacteria involved in anaerobic biodegradation of four specified biodegradable polyesters [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2013,98(6):1182–1187.
- [113] Gadaleta G, De Gisi S, Chong Z K, et al. Degradation of thermoplastic cellulose acetate-based bioplastics by full-scale experimentation of industrial anaerobic digestion and composting [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023,462:142301.
- [114] Gadaleta G, De Gisi S, Todaro F, et al. Carbon Footprint and Total Cost Evaluation of Different Bio-Plastics Waste Treatment Strategies [J]. *Clean technologies*, 2022,4(2):570–583.
- [115] Kakadellis S, Woods J, Harris Z M. Friend or foe: Stakeholder attitudes towards biodegradable plastic packaging in food waste anaerobic digestion [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2021,169:105529.
- [116] Ruggero F, Gori R, Lubello C, et al. Methodologies to assess biodegradation of bioplastics during aerobic composting and anaerobic digestion: A review [J]. *Waste Management*, 2019,37(10):959–975.
- [117] Song J H, Murphy R J, Narayan R, et al. Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2009,364(1526):2127–2139.
- [118] Dilkes-Hoffman L, Pratt S, Lant P, et al. The role of biodegradable plastic in solving plastic solid waste accumulation. *Plastics to Energy* [Z]. Australia: Dilkes, 2019.

- [119] Zhang F, Zhao Y, Wang D, et al. Current technologies for plastic waste treatment: A review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,282: 124523.
- [120] Jang M, Yang H, Park S A, et al. Analysis of volatile organic compounds produced during incineration of non-degradable and biodegradable plastics [J]. *Chemosphere*, 2022,303:134946.
- [121] Zheng J, Suh S. Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics [J]. *Nature Climate Change*, 2019,9(5):374–378.
- [122] Choi B, Yoo S, Park S I. Carbon footprint of packaging films made from LDPE, PLA, and PLA/PBAT blends in South Korea [J]. *Sustainability*, 2018,10(7):2369.
- [123] Abraham A, Park H, Choi O, et al. Anaerobic co-digestion of bioplastics as a sustainable mode of waste management with improved energy production—a review [J]. *Bioresource Technology*, 2021,322: 124537.
- [124] Jafari-sales A, Shahniani A, Bagherizadeh Y. Bioplastics and the Environment [J]. *Electron J Biol*, 2017,13:274–279.
- [125] Yates M R, Barlow C Y. Life cycle assessments of biodegradable, commercial biopolymers—A critical review [J]. *Resources, Conservation Recycling*, 2013,78:54–66.
- [126] 吴慧芳,孔火良.垃圾填埋场有机污染物的生物降解机理 [J]. *工业安全与环保*, 2005,(4):19–21,9.
Wu H F, Kong H L. Microbial decomposition mechanism for organic pollutants at solid waste landfills [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2005,(4):19–21,9.
- [127] Ishigaki T, Sugano W, Nakanishi A, et al. The degradability of biodegradable plastics in aerobic and anaerobic waste landfill model reactors [J]. *Chemosphere*, 2004,54(3):225–233.
- [128] Boonmee C, Kositanont C, Leejarkpai T. Degradation behavior of biodegradable plastics in thermophilic landfill soil and wastewater sludge conditions [J]. *Environmental Research, Engineering Management*, 2022,78(1):57–69.
- [129] Adamcova D, Vavrkova M D. New Polymer Behavior Under the Landfill Conditions [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2016,7(6): 1459–1467.
- [130] Ren X. Biodegradable plastics: a solution or a challenge? [J]. *Journal of cleaner Production*, 2003,11(1):27–40.
- [131] Baldasano J M, Gasso S, Perez C. Environmental performance review and cost analysis of MSW landfilling by baling–wrapping technology versus conventional system [J]. *Waste Management*, 2003,23(9): 795–806.
- [132] Chidambarampadmavathy K, Karthikeyan O P, Heimann K. Sustainable bio-plastic production through landfill methane recycling [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017,71:555–562.
- [133] Xu B, Chen Y, He J, et al. New insights into the biodegradation of polylactic acid: from degradation to upcycling [J]. *Environmental Reviews*, 2022,30(1):30–38.
- [134] Vea E B, Romeo D, Thomsen M J P C. Biowaste valorisation in a future circular bioeconomy [J]. *J Procedia Cirp*, 2018,69:591–596.
- [135] Ellis L D, Rorrer N A, Sullivan K P, et al. Chemical and biological catalysis for plastics recycling and upcycling [J]. *Nature Catalysis*, 2021,4(7):539–556.
- [136] García-Depraet 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 Advances*, 2021,53:107772.
- [137] Lee S, Lee J, Park Y-K, et al. Simultaneous upcycling of biodegradable plastic and sea shell wastes through thermocatalytic monomer recovery [J]. *ACS Sustainable Chemistry*, 2022,10(42): 13972–13979.
- [138] Eang C, Nim B, Sreearunothai P, et al. Chemical upcycling of polylactide (PLA) and its use in fabricating PLA-based super-hydrophobic and oleophilic electrospun nanofibers for oil absorption and oil/water separation [J]. *New Journal of Chemistry*, 2022,46(31): 14933–14943.
- [139] Xie S, Sun Z, Liu T, et al. Beyond biodegradation: ethyl lactate catalyzed by quaternary ammonium fluo Chemical upcycling of poly (lactic acid) plastic waste to m ride [J]. *Journal of Catalysis*, 2021, 402:61–71.
- [140] Thakur S, Chaudhary J, Sharma B, et al. Sustainability of bioplastics: Opportunities and challenges [J]. *Current opinion in Green Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2018,13:68–75.
- [141] Shao L, Chang Y-C, Hao C, et al. A chemical approach for the future of PLA upcycling: from plastic wastes to new 3D printing materials [J]. *Green Chemistry*, 2022,24(22):8716–8724.
- [142] Pantelic B, Ponjavic M, Jankovic V, et al. Upcycling biodegradable PVA/starch film to a bacterial biopigment and biopolymer [J]. *Polymers*, 2021,13(21):3692.
- [143] Abu-thabit N Y, Pérez-rivero C, Uwaezuoke O J, et al. From waste to wealth: Upcycling of plastic and lignocellulosic wastes to PHAs [J]. *Journal of Chemical Technology*, 2022,97(12):3217–3240.
- [144] Roux M, Varrone C J P. Assessing the economic viability of the plastic biorefinery concept and its contribution to a more circular plastic sector [J]. *Polymers*, 2021,13(22):3883.
- [145] Ishii N, Inoue Y, Tagaya T, et al. Isolation and characterization of poly(butylene succinate)-degrading fungi [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2008,93(5):883–888.
- [146] Emadian S M, Onay T T, Demirel B J W M. Biodegradation of bioplastics in natural environments [J]. *Waste Management*, 2017,59: 526–536.
- [147] Rudnik E, Briassoulis D J I C, Products. Degradation behaviour of poly(lactic acid) films and fibres in soil under Mediterranean field conditions and laboratory simulations testing [J]. *Industrial Crops and Products*, 2011,33(3):648–658.
- [148] Boyandin A N, Prudnikova S V, Karpov V A, et al. Microbial degradation of polyhydroxyalkanoates in tropical soils [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013,83:77–84.
- [149] Maurizio T, Miriam W, Michela S, et al. Laboratory test methods to determine the degradation of plastics in marine environmental conditions [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2012,3:225.
- [150] Thellen C, Coyne M, Froio D, et al. A processing, characterization and marine biodegradation study of melt-extruded polyhydroxyalkanoate (PHA) films [J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2008, 16(1):1–11.
- [151] Akram N, Saeed M, Usman M, et al. Recycling of bioplastics: Mechanism and economic benefits [J]. *Handbook of Bioplastics and*

- Biocomposites Engineering Applications, 2023:629–648.
- [152] Dilkes-hoffman L, Pratt S, Lant P, et al. The role of biodegradable plastic in solving plastic solid waste accumulation [M]. *Plastics to energy*. 2019:469–505.
- [153] Narancic T, Verstichel S, Reddy Chaganti S, et al. Biodegradable plastic blends create new possibilities for end-of-life management of plastics but they are not a panacea for plastic pollution [J]. *Environmental science technology*, 2018,52(18):10441–10452.
- [154] Rameshkumar S, Shaiju P, O'connor K E, et al. Bio-based and biodegradable polymers – State-of-the-art, challenges and emerging trends [J]. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2020, 21:75–81.
- [155] Emadian S M, Onay T T, Demirel B J W M. Biodegradation of bioplastics in natural environments [J]. *Waste Management*, 2017,59: 526–536.
- [156] 聂 榕, 彭 伟, 吕 凡, 等. 生物可降解塑料厌氧消化降解研究进展 [J]. *环境卫生工程*, 2023,31(2):46–56.
- Nie R, Peng W, Lv F, et al. Research progress on degradation of biodegradable plastics during anaerobic digestion [J]. *Environment Sanitation Engineering*, 2023,31(2):46–56.
- [157] Ishii N, Inoue Y, Tagaya T, et al. Isolation and characterization of poly (butylene succinate)-degrading fungi [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2008,93(5):883–888.
- [158] Eang C, Nim B, Sreearunothai P, et al. Chemical upcycling of polylactide (PLA) and its use in fabricating PLA-based super-hydrophobic and oleophilic electrospun nanofibers for oil absorption and oil/water separation [J]. *New Journal of Chemistry*, 2022,46(31): 14933–14943.
- [159] Stasiškienė Ž, Barbir J, Draudvilienė L, et al. Challenges and strategies for bio-based and biodegradable plastic waste management in Europe [J]. *Sustainability*, 2022,14(24):16476.
- [160] European bioplastics [EB/OL]. [https:// www.european-bioplastics.org/bioplastics/waste-management/composting/html2016-1-1/2023-3-20](https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/waste-management/composting/html2016-1-1/2023-3-20).

作者简介: 韩石磊(1995–),男,河北沧州人,中国科学院生态环境研究中心硕士研究生,主要从事固体废弃物资源化研究.hanshilei21@mails.ucas.ac.cn.