

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.09.027

废弃塑料降解与回收再利用研究进展

靳小平¹, 朱玉方², 徐卉桐², 谭煜², 买买提江·依米提², 何明宇^{2,3}

(1. 大庆油田设计院有限公司, 黑龙江大庆 163712; 2. 新疆大学化工学院, 石油天然气精细化工教育部和自治区重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 3. 哈尔滨工业大学材料学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 综述了近年来废弃塑料降解与回收再利用的物理法和化学法的研究进展, 涉及环氧树脂、聚乙烯、聚氯乙烯等废塑料制品的一级回收和二级回收方法, 也涵盖了包括热解、化学溶剂、单体共聚等废塑料制品的三级回收和四级回收方法, 并对未来可持续发展趋势进行了展望。指出为了更好地对废弃塑料进行再生利用, 未来处理方法应朝着环境友好、经济性高的方向发展, 这不仅是当今主流趋势, 也是解决塑料污染问题的必然要求。

关键词: 废弃塑料; 降解; 回收再利用; 可持续发展

中图分类号: TQ322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)09-0139-06

Research Progress on Degradation and Recycling of Waste Plastics

Jin Xiaoping¹, Zhu Yufang², Xu Huitong², Tan Yu², YIMIT Mamatjan², He Mingyu^{2,3}

(1. Daqing Oilfield Design Institute Co., Ltd, Daqing 163712, China; 2. Key laboratory of Oil and Gas Fine Chemicals, Ministry of Education and Xinjiang Uyghur Autonomous Region, College of Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The research progress of physical and chemical methods for degradation and recycling of waste plastics in recent years was reviewed, which involved primary and secondary recovery methods of waste plastic products such as epoxy resin, polyethylene and polyvinyl chloride, and also covered tertiary and quaternary recovery methods of waste plastic products such as pyrolysis, chemical solvent and monomer copolymerization. The future sustainable development trend was looked forward. It was pointed out that in order to better recycle waste plastics, the future treatment methods should be developed in the direction of environmental friendliness and high economy, which is not only the mainstream trend today, but also the inevitable requirement to solve the plastic pollution problem.

Keywords: waste plastics; degradation; recycling and reuse; sustainable development

自20世纪50年代塑料制品推广以来, 由于其使用便捷、性能优良等特点, 塑料商品得到了广泛的应用^[1]。然而由于塑料的使用耐久性和耐分解性, 其大量的使用导致了废弃塑料管理不当的流行和“白色污染”, 对自然环境和人类生存环境都逐渐造成了威胁^[2]。自1950年以来, 塑料树脂和纤维的产量超过了78亿t, 其中一半以上的塑料产量出自2004年至2020年间。目前全球废弃塑料累计达63亿t, 1980年塑料废物的再利用率是0%, 直到2020年, 塑料废物的再利用率仅提高到10%左右, 约90%的废弃塑料被直接填埋或积累在自然环境中, 不仅严重污染了环境生态, 存在

于自然环境中的微塑料粒子, 还会成为有毒物质的载体通过食物链和饮用水对人体健康造成损害, 这在全球范围内得到了较高的关注和担忧^[3]。

我国近十几年来逐渐意识到塑料制品的可持续发展, 陆续出台颁布了相关政策来治理塑料污染^[4-6]。自2008年国务院发布《关于限制生产销售使用塑料购物袋》的政策以来, 发改委率先出台条例鼓励使用生物降解制品, 重点支持其开发利用, 而后在长春、武汉、天津等地设立示范区, 开发和推广生物降解制品^[7]; 2015起, 吉林、江苏、河北等省也陆续实施相关政策, 发布循环经济条例, 禁止销售不可降解塑

基金项目: 国家自然科学基金项目(21764013), 自治区研究生科研创新项目(XJ2020G033, XJ2021G032)

通信作者: 何明宇, 博士研究生, 主要从事高分子材料的空间行为与模拟研究

收稿日期: 2021-07-05

引用格式: 靳小平, 朱玉方, 徐卉桐, 等. 废弃塑料降解与回收再利用研究进展[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(9):139-144.

Jin Xiaoping, Zhu Yufang, Xu Huitong, et al. Research progress on degradation and recycling of waste plastics[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(9):139-144.

料袋或大力推广可降解塑料制品^[8];2017年,全生物降解材料被列入《十三五材料领域科技创新专题规划》^[9]。2018年至2020年间,国家发改委又先后通过了《中华人民共和国固体废物污染环境防治法(修订草案)》和《关于进一步加强塑料污染治理的意见(发改委资[2020]80号)》,旨在率先于部分地区、部分领域禁止、限制部分塑料制品的生产和使用^[10]。降低废弃塑料制品的危害以及寻找循环再利用途径,也是解决塑料污染问题的必然要求,将愈发受到科研人员的关注。

目前应用广泛的塑料制品是以化石资源为原料生产得到的石油基塑料,主要包括聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)、聚苯乙烯(PS)、聚氯乙烯(PVC)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)等,但是由于其高分子量以及高分子稳定性,石油基塑料在自然环境中几乎不会被降解,久而久之堆积为大量的白色污染。针对治理环境污染,如何高值化再利用废弃塑料的问题,国内外学者已经做了大量的研究^[11-12],可概括为物理法和化学法。笔者综述了目前针对废弃塑料降解与回收再利用的物理方法和化学方法,并对未来的发展趋势进行展望。

塑料商品从20世纪开始获得了巨大的发展,在社会经济中发挥了重要作用,在日常生活中的使用量也显著增长,美国2015年使用塑料的种类与数量见表1^[10]。

表1 美国2015年塑料使用情况^[10]

塑料聚合物种类	产量/t	回收量/t	回收率/%	废弃量/t	参考文献
PP	7 200	40	0.56	7 160	[13]
高密度聚乙烯(PE-HD)	5 600	600	10.71	5 000	[14]
低密度聚乙烯/低密度线型聚乙烯(PE-LD/PE-LLD)	7 300	400	5.48	6 900	[15]
PS	2 240	30	1.34	2 210	[16]
PVC	900	/	/	900	[17]
PET	4 500	850	18.89	3 650	[18]
聚乳酸(PLA)	50	/	/	50	[19]
其它	4 000	1 000	25	3 000	[20]
固体废物中的塑料总量	31 790	2 920	9.19	28 870	[21]

然而,目前全球的塑料经济和发展基本是线型单方向的,超过一半的塑料在生产和使用后被当做废料直接处理,没有回收再利用^[15]。随着对石油资源的依赖和由此造成的资源枯竭和环境污染逐渐加重,研究者们为了将线型经济变为循环模式付出了诸多努力,其中如何保持塑料废弃物的升级回收和高值化利用,仍然是目前研究的热点与难点。

1 物理法

物理法回收塑料大部分是直接造粒或者改性后作为塑料新料再次使用,主要涉及到塑料四级回收方法的一级回收和二级回收。一级回收是对未受污染的塑料进行简单回收,

以便在类似的应用中再次使用,虽然一级回收的成本很低,但它的缺点是重复使用周期有限且并不适用大多数实际情况^[22],但仍有一些学者另辟蹊径,结合尺寸效应等简单方法实现了废弃塑料的高值化利用。Tian Fei等^[23]采用以废治废的设计理念,通过简单的物理改性法将废旧的热固性树脂成功制备成一种孔径可调的油水分离材料。该方法不仅为热固性塑料回收利用提供了一种新的理念,而且为油水分离材料的设计提供了一种新的思路。研究表明,在微波加热条件下,使用绿色溶剂N-甲基吡咯烷酮(NMP)对废旧环氧树脂(EP)溶胀得到溶胀树脂(SEP),随后经过微波辅助制孔得到结构稳定的多孔树脂(PEP)。改性后树脂表面粗糙度从1.8 nm增加到63.1 nm,水接触角从81°增加到101°,树脂组成未发生变化,因此在保持热固性树脂良好的物理化学性能基础上可应用于油水分离领域。在无需外加压力条件下,PEP依靠油水混合自身重力可实现对油水乳液的高效分离,对粒径为3.5 μm的乳液分离通量达到2 306.78 L/(m²·h),且多次循环使用后,PEP仍保持很高的分离效率和分离通量。Liu Xuehui等^[24]利用热固性树脂本身的特性,通过简单物理方式成功实现了热固性树脂的升级回收。该方法简单易行,仅通过树脂的粉碎和颗粒的再组装,在不破坏树脂化学键的情况下,即可制备得到多种功能材料。研究表明,热固性环氧树脂颗粒(CEPs)通过简单的堆积即可实现对简单油水混合物的分离,分离通量可以达57 325 L/(m²·h),分离效率为99%,且改性后的CEPs(HEPs)还可以对多种油包水乳液进行分离且具有良好的循环稳定性;CEPs还可与不同的黏合剂相结合,可以制备粘附力不同的疏水涂层。当选用环氧树脂或聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为黏合剂时,所制得涂层的水接触角分别为144.6°,150.2°,粘附力分别为219,106 μN,可以用于表面储水(50 μL)及水的定向运输(170 μL)或用于水的收集(6 μL)。CEPs涂层具有优异的耐酸碱腐蚀性,在遇到酸性液体或者气体时即可显示肉眼可见的颜色变化,从而应用于酸性液体/气体的监测和信息存储等领域。

废弃塑料的二级回收是一个包括分类、清洗、熔融和重新成型加工的复杂过程,对塑料的物理性能和尺寸形式要求并不严格,如建筑和包装材料^[11]。尽管在不考虑性能损失的情况下,许多热塑性废弃塑料之间可通过相互共混来增强物理性能,但共混材料的均匀性和有限的下游应用途径则很难得以保证。目前二级回收主要是将废弃塑料作为回收填料与其它材料成型加工再次应用于建筑、包装以及管材等相关领域^[25-26]。S. Sanchez-Valdes等^[27]从城市固体废物中将PE-HD瓶手工分离、清洗、研磨,而后以不同质量分数与PE-HD纯料和纳米黏土复合制备复合材料,研究了PE-HD

接枝胺醇 (PE-HD-g-DMAE) 作为增容剂对复合材料力学和形态特征的影响。结果表明,从固体废物中回收的 PE-HD 分子量较低,具有较高熔体流动速率和低剪切黏度。通过傅里叶变换红外光谱证实了回收的 PE-HD 存在氧化官能团且与 PE-HD-g-DMAE 形成酯键。当回收 PE-HD 增容剂达到 60% 时,复合材料的力学性能依然保持优异。该项研究表明在某些情况下,回收的 PE-HD 可以更大比例地代替 PE-HD 新料,增加了回收塑料聚合物制造产品的多功能性和选择性。R. Juan 等^[28]采用不同来源的回收 PE-HD (rPE-HD) 以不同比例与 PE100 管材级的 PE-HD 共混,已确定其作为管材在管道应用中的可行性。结果表明,所有共混物的拉伸强度、断裂伸长率和弯曲弹性模量等性能均优于 PE100 管材级的最低要求。该项研究表明,以管道规格对 PE-HD 处理、分类和回收得到的 rPE-HD 可以替代部分 PE-HD 母料,可达到管道应用中 PE-HD 的闭环回收利用,符合可持续发展的经济目标和闭环经济的承诺。D. D. P. Moreno 等^[29]使用包装薄膜中的 PE-LD 废料与松木废料 (PWW) 通过挤出注塑直接制备了 PE-LD/PWW 复合材料,该种复合材料在 PWW 含量较低时 (1.5%~10%) 具有较高的断裂伸长率和较低的拉伸弹性模量,而 PWW 含量高于 10% 时则相反,且证实了复合材料在加工温度范围的热稳定性。该项研究可根据实际应用情况调节 PWW 的含量,也是使用低成本废弃塑料进行工业加工应用的经济选择。

除了废弃 PE 的二级回收与再利用外,研究者还进行了包括废弃 PVC、废轮胎树脂纤维、脂肪族聚酯 (PBS)、聚羟基脂肪酸酯 (PHA) 以及 PLA 塑料等的回收再利用以及在自然环境中降解行为的研究等。在混凝土中添加回收的塑料颗粒和回收的塑料纤维被证明可以显著提高传统混凝土的物理和力学性能以及耐久性,同时又可以确保环境效益^[30]。D. V. Bompa 等^[31]以回收聚氯乙烯废塑料 (rPVC) 为添加剂,研究了水泥基复合材料的基本力学性能,通过压缩应力-应变曲线和弯曲应力-裂纹张开曲线详细解释了材料内部的构效响应。通过大量的实验数据推算出了经验公式,可被用作开发分析其它包含 rPVC 和其它废塑料水泥材料的力学性能模型的基础,本研究增加了 PVC 废弃塑料的回收利用新策略和潜在应用范围。M. Abbaspour 等^[32]对废弃轮胎树脂纤维 (WTTF) 的再利用进行了土壤加固评估,对添加了不同质量分数 (0.5%, 1%, 2%, 3%, 4%) 的两种粘质和砂质土壤进行了抗压强度 (UCS)、加重承载比 (CBR) 和劈裂抗拉强度 (STS) 测试。结果表明,WTTF 可以提高砂质土壤的所有强度和延展性,虽然粘质土壤的 UCS 和 CBR 降低,但其 STS 和延展性均有较大提高。此项研究证明 WTTF 可以很好地用于提高各类土壤的力学性能,而不是以掩埋和直

接焚烧的方式处理,也降低了土木工程项目中原材料的成本。I. N. Georgousopoulou 等^[33]研究了 PBS 的物理回收可能。结果表明,当加入 0.1% 稳定剂 1010 时, PBS 在再成型加工中的降解被显著抑制,熔体结晶速率变慢,有效地保护了聚合物的性能。而当添加量超过 0.5% 后,再加工成型的聚合物性能开始下降。PBS 循环再加工 5 次后,仍然保持有不俗的热性能和力学性能。L. S. Dilkes-Hoffman 等^[34]研究了 PHA 在自然海洋环境中的降解时间框架和预测模型,将其应用于 PHA 产品的寿命估算。结果表明, PHA 在该环境下的平均自然降解速率 $0.04 \sim 0.09 \text{ mg}/(\text{d} \cdot \text{cm}^2)$,换言之,一个 PHA 水瓶可能需要 1.5~3.5 a 才能完全自然降解。E. Rudnik 等^[35]在地中海的野外条件和实验室条件下对 PLA 薄膜在土壤中 11 个月的降解情况进行了研究和比对。结果表明样品在地中海条件下降解速度较慢,材料虽并没有完全降解,但力学性能等性质已经开始了退化,这表明实际应用的废弃 PLA 材料在自然环境中的完全降解还需要更长的时间和更高的温度,且样品厚度也是影响降解情况关键的因素。Lin Hsiang-Yu 等^[36]开创了一种高效创新的辐照降解方法来解决 PLA 废弃塑料的处理问题,通过使用 γ 射线和脉冲光照分析和模拟材料的质量损失和热反应性,以实现对环境有益的 PLA 废物处理方案的改进操作设计。

2 化学法

化学法回收废弃塑料主要涉及到四级回收方法的三级回收和四级回收,其中三级回收主要是化学回收,四级回收主要为能量回收。目前针对于废弃塑料的回收过程过于依赖物理法回收也就是一级回收和二级回收,因为物理法回收的运行成本低,需要的专业技术少,因此占有回收操作的 75% 以上。此外,与原始母料相比,通过熔融和再成型加工的聚合物塑料具有较低的分子量,力学性能和热性能也被降低,与新料比较应用面变窄,导致全球塑料废物的产量持续增加^[37]。因此研究开发高效的化学回收再利用方法对实现与回收相关的巨大经济和环境效益至关重要。

2.1 热解

热解,是指塑料在催化剂的作用下高温裂解,分子链分解成更小的中间产物。这种方法的一个主要优点是,它可以处理不同类型塑料的混合物,并能够减轻废塑料中各种有机、无机或生物残留物的负面影响,大多数热解研究都集中于最大化液体油产率和优化质量上^[22]。目前研究者已经对 PP, PE, PS 等废弃塑料的反应条件进行了优化,其中 PS 的液体燃料产量最高^[38-40]。在 450℃ 左右,90% 以上的 PP 和 PE 可以转化为轻油;而在 425℃ 左右,PS 可通过热解得到 97% 的液体油产品^[40]。除此之外, Song Changyuan 等^[41]提出了可控碳化策略回收再利用 PP。可控碳化包括两个步骤,

第一是在降解催化剂作用下 PP 选择性降解生成易于成碳的小分子产物,第二是这些降解产物在成碳催化剂作用下的碳化生成碳材料。研究表明,微量的聚离子液体与 NiO 的组合催化可以高效催化废弃 PP 的可控碳化,而调控聚离子液体的种类可以制备不同形貌的碳材料,而且 NiO 最后被还原生成梨型的单质镍,镶嵌在碳管的一端,废弃 PP 碳化产物无需纯化即可一步制备 Ni/CNM 复合材料。Ni/CNM 复合材料具有较高的比表面积、较好吸光性能、较高光热转换性能等,从而赋予了优异的太阳能光热海水淡化性能。在 1 个太阳光强下,产水速率达到 $1.67 \text{ kg/m}^2/\text{h}$,能量转化效率为 95%,盐去除率高于 99.99%。与此同时,对于染料污水、生活废水、河水和油水都有很好分离纯化效果,达到了饮用水的标准。Gong Jiang 等^[42]致力于废弃塑料的可控碳化,提出了组合催化^[43-44]、活性模板碳化^[45]和快速碳化^[46]等策略,不仅为废弃塑料回收再利用提供新途径,还为制备功能性碳材料提供新方法。电子显示外壳塑料含大量卤代化合物,如溴化阻燃剂(BFRs)和 PVC 等,Zhang Congcong 等^[47]利用改进的生态友好型/超临界二氧化碳(SC-CO₂)方法开发了一种新的、可持续的处理这类塑料的方法。研究表明,反应体系中 BFRs 首先被提取出来,而后迅速与 PVC 发生反应,二者生成 HBr 和 HCl 气体,最佳反应条件为 398.33°C 、1.33 h 和 0.63 MPa,经过简单的分离处理后可得到固体碳材料和有机化学原料。复杂的含卤塑料被安全处理,无卤产品被回收,而不使用催化剂或添加剂。本研究为含卤素塑料的处理和回收提供了一种适用的绿色处理方法。Guo Zengwei 等^[48]以镁铝复合氧化物颗粒作为催化剂,研究了在聚酯纺织废料循环回收的可行性。研究表明,尽管镁铝复合氧化物颗粒的催化性能要略低于其在相同温度下单独粒子的催化性能,但复合氧化物颗粒具有良好的可循环性能,可循环三次以上。在催化降解过程中(240°C , 2 h),回收产物单体对苯二甲酸双羟乙基酯(BHET)的物质的量收率超过 80%,由 BHET 可制备特性黏度为 0.67 的再生聚酯,与原始纤维聚酯表现出相当的可纺性。S. P. Kusumocahyo 等^[49]以废弃 PET 包装瓶为原料,采用相转化技术(100°C , 1 h)开发了超滤膜,在含有牛血清蛋白的水溶液中显示出高达 91% 的水渗透通量。这一研究结果表明,利用废弃 PET 瓶制备超滤膜具有很大前景,有助于回收 PET 材料生产更高级的产品。

2.2 化学溶剂

化学溶剂靶向降解是塑料废物非特异性分解的替代方法。这种方法在理论上提供了更高的效率和更低的能量输入,并产生了更高比例的纯降解产物,从而产生了更高的经济价值^[50]。C. Gutierrez 等^[51]报道了一种环境友好回收 PS 的方法,该过程包括在柠檬烯中溶解 PS 和使用 SC-CO₂

除去溶剂,最佳反应条件为高压(10 MPa)、低温(30°C)和中等浓度(0.4 g/mL),PS 的回收率可达 95% 以上。D. S. Achilias 等^[52]从二氯甲烷/甲醇、丙酮/甲醇、氯仿/甲醇三种溶剂系统中回收了常见于电子废塑料中包含的聚碳酸酯(PC)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)和 PS 三种聚合物模型。研究表明,即使在低温下,PC 在二氯甲烷/甲醇溶剂体系中的回收率也可达到 98%,对于相同溶剂体系,电子废塑料回收的结果与模型聚合物回收的结果相同,两种回收的聚合物的化学结构没有明显差异,这表明在溶解回收的过程中没有发生热力学降解。A. J. Hadi 等^[53]开发了一种低成本的溶剂体系来回收聚烯烃(PP, PE-HD, PE-LD),在纯松节油、PET/松节油和松节油/苯作为不同馏分的溶剂,PET/正己烷作为弱溶剂的条件下回收聚烯烃。研究表明,回收聚合物的热性能和拉伸性能较纯料有小幅下降,但高温和低聚合物浓度的一定条件范围内,聚烯烃的回收率可保持在较高的水平。对于废弃 PVC 管材,Qiao Wenming 等^[54]使用有机溶剂从无机物中分离 PVC,室温下 24 h 的回收率达到 86%。G. Grause 等^[55]使用四氢呋喃、环己酮和环戊酮可有效地将 PVC 从聚酯纤维中溶解出来。在一项最近的研究中,T. Hanaoka 等^[56]报道了一种可在低温(80°C)和常压条件下硝酸降解的环氧树脂。结果表明,通过制备了几种不同类型的环氧树脂,阐明了其硝酸分解行为,对设计和改进循环使用环氧树脂的工艺提供参考价值。S. Yousef 等^[57]报道了一种从纺织废料中回收聚酯纤维和棉纤维的可持续绿色技术。首先将废牛仔裤浸泡在硝酸中以去除染料,之后用绿色亲水溶剂将聚酯溶解并与棉纤维分离,分离后的聚酯可通过蒸馏提纯回收。经济评估结果显示,应用此技术回收处理废弃纤维,每吨可获得 1 629 美元的经济回报和减少相当于 1440 kg CO_2 的碳排放量。

2.3 单体共聚

单体共聚是指利用与低成本单体共聚的方法,向聚合物材料的分子链上引入可降解基团的策略,在维持原材料优异性能的同时,赋予聚合物交联网络可降解性和回收再加工性。P. Shieh 等^[58]利用少量(10% 体积分数)的可降解环状硅醚单体 iPrSi 与双环戊二烯(pDCPD)共聚所获得了具有可温和降解和回收再加工性能的热固性塑料。通过对比实验表明,即使使用高达 80%(体积分数)的可降解交联剂 SiXL 时,也无法获得可完全降解的热固性聚合物。同时,在聚合物网络中,可降解基团的位置对于其降解能力具有至关重要的影响。这一普遍拓扑特征对于设计下一代可降解的热固性聚合物具有指导意义。Mu Shiling 等^[59]通过将棕榈油甲基苯基丙烯酸甲酯单体转化为环氧单体,制备了棕榈油基环氧聚合物,使用柠檬酸固化后得到了可通过酯交换反应重

排化学网络且具有可重构形状记忆特性的可回收环氧树脂。Zhou Quan 等^[60]采用温和有效的方法合成了一种含动态二硫键和碳氮键的芳香胺固化剂,用于固化环氧树脂,得到了一种具有良好力学性能和热性能的可降解热固性材料,同时由于双共价键的存在,热压下可促进树脂的再成型利用。Chen Xianchao 等^[61]和 Su Xuzheng 等^[62]分别用生物基 2,5-呋喃二甲酸(FDCA)和香兰素为原料合成了可降解和可回收再加工的超支化环氧树脂,由于分子内空腔和超支化拓扑结构等赋予了其良好的性能。综上所述,由于大部分废弃塑料的不可降解性,目前针对其降解与回收再利用的方法主要分为物理法(一级、二级回收)和化学法(三级、四级回收)(见表2)。

表2 塑料废物回收方式的分类

回收级别	主要工艺过程	输入	输出	主要优势	主要劣势	参考文献
一级	在制造过程的闭环中重复加工	未受污染的单一类型聚合物废物	接近塑料母料的材料	理论上零浪费的闭环过程	聚合物的成分必须非常纯净	[26]
二级	废塑料的机械加工(清洗、切碎、再加工)	PP、PE-HD 和 PET 废料和薄片	具有“降级”属性的新产品	流程较为简单	产品机械性能和其他物理性能的损失	[22]
三级	热解	大多数常见的塑料垃圾	合成的再生单体或低聚物原料	可以处理混合的塑料聚合物	需要广泛地优化原料和工艺	[14]
四级	焚烧和能源生产	各种混合废塑料	电能、热能等	适用于处理塑料混合物	有毒气体和其他固体废物的排放	[39]

在物理回收中,塑料固体废物被分拣、清洗、重新成型加工为具有相同特性的产品,不同塑料的回收机理和方法不同,分子量变化和材料性能降低、成本和分类问题也是高效物理回收受到的主要挑战。在化学回收中,塑料废物被转化为燃料和各种化学原料以及各自聚合物单体,理论上可以获得较高比例提纯产物,但在实际工业生产中,化学法常常伴随着高温、高压等严苛条件,这就对基础设施投资和研发需求及费用提出了较高需求,大规模应用仍面临着不小阻力。

3 结语

尽管“限塑令”等政策已经提出并落实,仍然有很大一部分废弃塑料是采用直接填埋和焚烧方式进行处理。这不仅没有做到循环经济的可持续发展,也对生态环境和人类健康产生了不可估量的危害。随着石油资源的枯竭、可利用土地资源的减少,废弃塑料的降解与回收再利用意义非凡^[63]。为了更好地对废弃塑料进行再生利用,未来处理方法应朝着环境友好、经济性高的方向发展,具体体现在如下几个方面:

(1) 提高废弃塑料的分拣技术。目前的废弃塑料回收研

究大多是针对某种特定塑料成分,然而实际情况中多种不同性质的塑料往往是大量掺杂在一起的,针对某一种成分进行回收处理可能会导致新的废弃物污染。或开发经济实用的新型增容剂兼顾复杂多样的塑料组分,提高不同组分之间的相容性以达到废弃物的良好性能和高值化利用。

(2) 采用化学法处理废弃塑料时,往往伴随着高温、高压等苛刻条件,操作难度性大且有安全隐患。未来应更倾向于寻找条件温和、将废弃塑料可控碳化的生产工艺,同时寻找安全、无毒副作用且使用寿命长的催化剂以应对工业生产。

(3) 目前已经有了一些从分子设计的角度上合成可降解聚合物的研究^[64-66],但整体流程成本较高且制备难度较大,大多数研究设计仍停留在实验室阶段,难以工业化。制备合成工艺简单且价格低的可降解聚合物具有较好的研究潜力。

(4) 生物酶技术作为一种环境友好手段降解废弃塑料而广受关注,然而目前发现的可降解塑料的生物酶种类有限,降解效率不高,且降解机理仍不明确,各类研究还处在起始阶段,这都成为了制约生物酶塑料降解发展的关键问题。继续探索研究生物酶降解技术,对于解决塑料污染问题具有重大意义。

(5) 大力发展生物可降解塑料制品以及积极寻找传统塑料的替代品。目前已经报道了一些以仿生结构受启发制备的高性能塑料替代品,该种材料集成了多种优异的宏观特性,展现出比塑料薄膜更突出的综合性能,在光电转换、柔性电子器件等领域具有竞争力。为了更好地防治塑料污染,发展新一代可持续塑料替代材料迫在眉睫。

参考文献

- [1] 高文杰,等. 塑料科技,2021,49(2):111-116.
Gao Wenjie, et al. *Plastics Science and Technology*, 2021, 49(2):111-116.
- [2] 王琪,等. 中国工程科学,2021,23(1):160-166.
Wang Qi, et al. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(1):160-166.
- [3] Kumar S, et al. *Chemical Papers*, 2020, 74(11):3 785-3 807.
- [4] 李国庆. 人民论坛,2021(Z1):78-80.
Li Guoqing. *People's Tribune*, 2021, 4(Z1):78-80.
- [5] 王洛忠,等. 行政论坛,2020,27(5):69-80.
Wang Luozhong, et al. *Administrative Tribune*, 2020, 27(5):69-80.
- [6] 王胜利,等. 生态经济,2020,36(5):9-12.
Wang Shengli, et al. *Ecological Economy*, 2020, 36(5):9-12.
- [7] 曾伟立. 塑料制造,2008(3):35.
Zeng Weili. *Plastics Manufacture*, 2008, 4(3):35.
- [8] 熊云川. 建材发展导向,2015,13(20):76.
Xiong Yunchuan. *Development Guide to Building Materials*, 2015, 13(20):76.
- [9] 高新司. 表面工程与再制造,2017,17(Z1):13-14.
Gao Xinsi. *Surface Engineering and Remanufacturing*, 2017, 17(Z1):13-14.

- [10] 侯琼,等. 环境与可持续发展,2020,45(05):30–33.
Hou Qiong, et al. Environment and Sustainable Development, 2020,45(5):30–33.
- [11] Thakur S, et al. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry,2018:32–38.
- [12] 曹贤武,等. 现代塑料加工应用,2020,32(3):1–4.
Cao Xianwu, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2020,32(3):1–4.
- [13] Gu Lei, et al. Waste Management,2016,51(5):19–42.
- [14] Ma Chuan, et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016,61:433–450.
- [15] Wong S L, et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015,50:1 167–1 180.
- [16] Vila-Cortavitarte M, et al. Journal of Cleaner Production,2018, 170:1 279–1 287.
- [17] Jang Mi, et al. Environmental Pollution,2017,231:785–794.
- [18] Ragaert K, et al. Waste Management,2017,69:24–58.
- [19] Narancic T, et al. Environmental Science & Technology,2018, 52(18):10 441–10 452.
- [20] Messal S, et al. Journal of Electrostatics,2017,89(10):59–68.
- [21] Wilcox C, et al. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2015,112(38):11 899–11 904.
- [22] Lee A, et al. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2021,23:32–43.
- [23] Tian Fei, et al. Materials Horizons,2019,6:1 733–1 739.
- [24] Liu Xuehui, et al. Materials Horizons,2021,8:234–243.
- [25] Thakur S, et al. Vacuum,2017,146:342–355.
- [26] Schyns Z O G, et al. Macromolecular Rapid Communications, 2020,42(9):415–441.
- [27] Sanchez-Valdes S. Iranian Polymer Journal,2021,30:297–305.
- [28] Juan R, et al. Journal of Cleaner Production,2020, 276(12):124 081–124 92.
- [29] Moreno D D P, et al. Composite Structures,2017, 176(9):1 152–1 157.
- [30] Batayneh M, et al. Waste Management,27(12):1 870–1 876.
- [31] Bompa D V, et al. Construction and Building Materials,2021, 275:122 159–122 172.
- [32] Abbaspour M, et al. Journal of Cleaner Production,2018, 207:1 059–1 071.
- [33] Georgousopoulou I N, et al. Polymer Degradation & Stability, 2016,128(6):182–192.
- [34] Dilkes-Hoffman L S, et al. Marine Pollution Bulletin,2019, 142(5):15–24.
- [35] Rudnik E, et al. Industrial Crops & Products,2011,33(3):648–658.
- [36] Lin Hsiang-Yu, et al. Journal of Environmental Polymer Degradation,2018,26(1):122–131.
- [37] Garcia J M, et al. Science,2017,358(6365):870–872.
- [38] Bridgwater A V. Biomass & Bioenergy,2012,38:68–94.
- [39] Adrados A, et al. Waste Management,2012,32:826–832.
- [40] Czajczynska D, et al. Thermal Science and Engineering Progress, 2017,3(9):171–197.
- [41] Song Changyuan, et al. Science China Materials,2020, 63(5):779–793.
- [42] Gong Jiang, et al. Progress in Polymer Science,2019,94:1–32.
- [43] Tang Tao, et al. Angewandte Chemie-International Edition,2005, 44:1 517–1 520.
- [44] Gong Jiang, et al. Applied Catalysis B:Environmental,2012, 117–118(18):185–193.
- [45] Ju Myungjong, et al. Journal of Materials Chemistry A,2015, 3(8):4 413–4 419.
- [46] Gong Jiang, et al. Journal of Materials Chemistry A,2013, 1(17):5 247–5 255.
- [47] Zhang Congcong, et al. Journal of Hazardous Materials,2020, 382(1):401–410.
- [48] Guo Zengwei, et al. Journal of Cleaner Production,2021, 283(2):579–586.
- [49] Kusumocahyo S P, et al. Journal of Environmental Chemical Engineering,2020,8(12):381–391.
- [50] Zhao Yibo, et al. Chemosphere,2018,209:707–720.
- [51] Gutierrez C, et al. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2016,55:335–342.
- [52] Achilias D S, et al. Polymer Bulletin,2009,63:449–465.
- [53] Hadi A J, et al. Journal of Polymer Engineering,2013,33:471–481.
- [54] Qiao Wenming, et al. Waste Management,2007,27:1 884–1 890.
- [55] Grause G, et al. Journal of Material Cycles and Waste Management,2017,19:612–622.
- [56] Hanaoka T, et al. Polymer Degradation and Stability,2021, 186(4):537–544.
- [57] Yousef S, et al. Journal of Cleaner Production,2020.doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120078.
- [58] Shieh P, et al. Nature,2020,583(7):542–555.
- [59] Mu Shiling, et al. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020,8:5 269–5 304.
- [60] Zhou Quan, et al. ACS Applied Polymer Materials,2020, 2:1 863–1 873.
- [61] Chen Xianchao, et al. Green Chemistry,2020,22(1):4 187–4 198.
- [62] Su Xunzheng, et al. European Polymer Journal,2020, 140(23):110 053–110 061.
- [63] 何露,等. 高分子通报,2021(2):18–28.
He Lu, et al. Polymer Bulletin,2021,34(2):18–28.
- [64] Hatti-Kaul R, et al. Trends in Biotechnology,2020,38(1):50–67.
- [65] McGuire T M, et al. Polymer Chemistry,2020,11:5 844–5 860.
- [66] Kawaguchi H, et al. Bioresource Technology,2017, 245:1 664–1 673.