

废塑料处置与利用技术研究进展

孙昱楠¹, 张帆¹, 李建国², 张闾楠¹, 李宁^{3,4}, 穆兰¹, 程占军^{3,5},
颜蓓蓓^{3,6}, 陈冠益^{1,3,4*}, 侯立安^{3,7}

(1. 天津商业大学环境能源+X创新实验室 / 机械工程学院, 天津 300134; 2. 天津商业大学生物技术与食品科学学院, 天津 300134; 3. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 4. 天津市生物质废物利用重点实验室, 天津 300350; 5. 天津市有机固废安全处置与能源利用工程研究中心, 天津 300350; 6. 天津市生物质燃气燃油技术工程研究中心, 天津 300350; 7. 中国人民解放军 96911 部队, 北京 100089)

摘要: 塑料制品是制造业的重要产品类型, 产业发展质量与经济社会息息相关; 在现阶段面临资源环境约束趋紧的背景下, 合理处置并利用废塑料对经济和环境可持续发展至关重要。塑料制品种类更加丰富, 相应处置技术及应用挑战不断更新, 与产业高质量发展、严格的环保要求相叠加, 凸显了系统梳理废塑料处置与利用研究进展的迫切性。本文就废塑料处置与利用技术体系进行了细致分类, 主要从废塑料的机械处置、能源与资源转化、再生循环利用、处置与利用新技术4个方面阐明了技术特点、适用条件、研究进展。在此基础上, 借鉴发达国家已有经验、针对相关技术应用挑战, 提出了从源头减量并鼓励再生塑料使用、强化废塑料分类回收力度、推动技术创新与成果转化等应对建议, 以期为我国废塑料清洁处置与回收利用研究提供参考。

关键词: 废塑料; 处置与利用; 资源化; 资源化; 循环利用

中图分类号: X705 **文献标识码:** A

Advances in Waste Plastic Disposal and Utilization Technology

Sun Yu'nan¹, Zhang Fan¹, Li Jianyuan², Zhang Hongnan¹, Li Ning^{3,4}, Mu Lan¹,
Cheng Zhanjun^{3,5}, Yan Beibei^{3,6}, Chen Guanyi^{1,3,4*}, Hou Li'an^{3,7}

(1. Interdisciplinary Innovation Lab for Environment and Energy/School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China; 2. School of Biotechnology and Food Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 4. Tianjin Key Laboratory of Biomass Wastes Utilization, Tianjin 300350, China; 5. Tianjin Engineering Research Center for Organic Wastes Safe Disposal and Energy Utilization, Tianjin 300350, China; 6. Tianjin Engineering Research Center for Biomass Gas and Oil Technology, Tianjin 300350, China; 7. 96911 Unit of Armed Force, Beijing 100089, China)

Abstract: Plastic products are a significant component of the manufacturing industry and the plastic industry is closely related to economic and social development. As constraints from resources and environment tighten, rational disposal and utilization of waste

收稿日期: 2022-11-23; **修回日期:** 2023-03-13

通讯作者: *陈冠益, 天津商业大学教授, 研究方向为生物质固废清洁处置与能源利用; E-mail: chen@tju.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“云南乡村生活垃圾分类处置新方法资源化利用咨询研究”(2022YNZH3); 国家自然科学基金项目(52100156, 52176197)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

plastics becomes crucial for the sustainable economic and environmental development. Currently, the variety of plastic products becomes abundant, and disposal technologies and application challenges are constantly updated. Considering the demand for high-quality development of the industry and increasingly strict environmental protection requirements, a systematic analysis of the research progress of waste plastic disposal and utilization becomes urgent. In this study, the waste plastic disposal and utilization technologies are categorized into mechanical disposal of waste plastics, energy and resource conversion, regeneration recycling, and new technologies for disposal and utilization. These four types of technologies are expounded from the aspects of technical features, applicable conditions, and research progress. On the basis, facing the technical challenges and referring to the existing experience of developed countries, suggestions are proposed from the aspects of source reduction, sorted recycling of waste plastics, and technological innovation and transformation, hoping to provide a reference for the clean disposal and recycling of waste plastics in China.

Keywords: waste plastic; disposal and utilization; energy utilization; resource utilization; recycling

一、前言

当前,我国着力进行发展方式的绿色转型,深入推进环境污染防治,积极稳妥推进碳达峰、碳中和(“双碳”)目标,高度关注能源的清洁、低碳、高效利用。资源与能源一样是国民经济发展的命脉,然而我国部分资源对外依存度偏高,整体供应形势较为严峻,亟需进行合理利用。塑料作为现代生活和生产中的重要资料类型^[1],其制备、使用、末端处置等均与能源、经济、环境联系紧密;尤其是废塑料的处置与利用和生态文明建设、循环经济发展息息相关,成为未来可持续发展的关键因素之一。

自20世纪初起,塑料的生产和应用发展迅速,主要类型有聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚氯乙烯(PVC)、聚苯乙烯(PS)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯聚合物(ABS)、尼龙(PA)、聚乳酸(PLA)等^[1,2]。2021年全球塑料总产量约为 3×10^8 t^[3,4],预计2050年全球生产塑料所需的石油量可占全部石油消耗量的20%^[5]。2021年我国塑料制品产量约为 8×10^7 t(同比增长5.9%),使用量约为 9.088×10^7 t(同比增长12.2%)^[6]。废塑料产量与塑料使用量保持同步增长,在环境中逐渐积累而形成“白色污染”;全球废塑料的年均产量约为 3×10^8 t,预计到2050年环境中的废塑料累计可达 1.20×10^{10} t^[7]。与此同时,废塑料对生物多样性和安全性构成明显威胁^[8],无法降解的微塑料进入环境、生物体内会引发相应的污染和疾病。到2050年,海洋中的废塑料可达 9.37×10^8 t;如不加以干预,将有超过 8.95×10^8 t的海洋生物受到直接影响^[9]。

自1950年以来,全球累计产生超过 9×10^9 t的废塑料,其中70%被填埋、11%用于焚烧、19%被

回收利用^[10]。在我国,2021年的废塑料产量约为 6.2×10^7 t,其中35%被填埋、33%用于焚烧,31%被回收利用,1%被遗弃。在当前全球资源短缺的背景下,塑料因其高的碳氢比及热值,低的磷、硫、灰分含量等特点而被视为一种可再生资源^[11]。因此,国内外针对废塑料处置技术进行了大量的基础与应用研究,深化了对废塑料的回收、高效处置、回收所产生的低品质塑料或高价值能源产品^[12,13]、环境及人体健康影响等的认识,提高了废塑料的高效处置及回收利用水平。已有研究可分为:针对某一类/几种废塑料的处置与利用技术分析^[2,5];着重关注一种类型的处置技术并总结可处置的废塑料^[10,12],对市场上的主要处置与利用技术进行概要归纳^[1,11,14](但未讨论新技术)。

得益于材料与制造业的迅速发展,废塑料的处置与利用已不再局限在填埋、焚烧等传统处置模式。随着废塑料种类不断丰富、处理技术更新进步,全面梳理相应处置与利用技术体系并明晰发展途径,有助于立足国情实际把握领域发展重点。本文经过技术梳理,从机械处置、能源与资源转化、再生循环利用、新技术4个方面,形成废塑料处置与利用技术的分类(见图1)^[2,15-31];比较各类技术的特点、使用条件、当前发展状况,掌握废塑料处置与利用的行业现状及发展挑战,为废塑料清洁高效回收、处置、利用研究提供直接参照,为构建我国废塑料能源与资源化回收体系提供基础参考。

二、废塑料机械处置技术

废塑料机械处置技术以便捷减量化目标为主,但普遍存在后续生态环境影响的问题,如填埋、海洋倾倒法会扩散微塑料的影响范围。在技术选择、

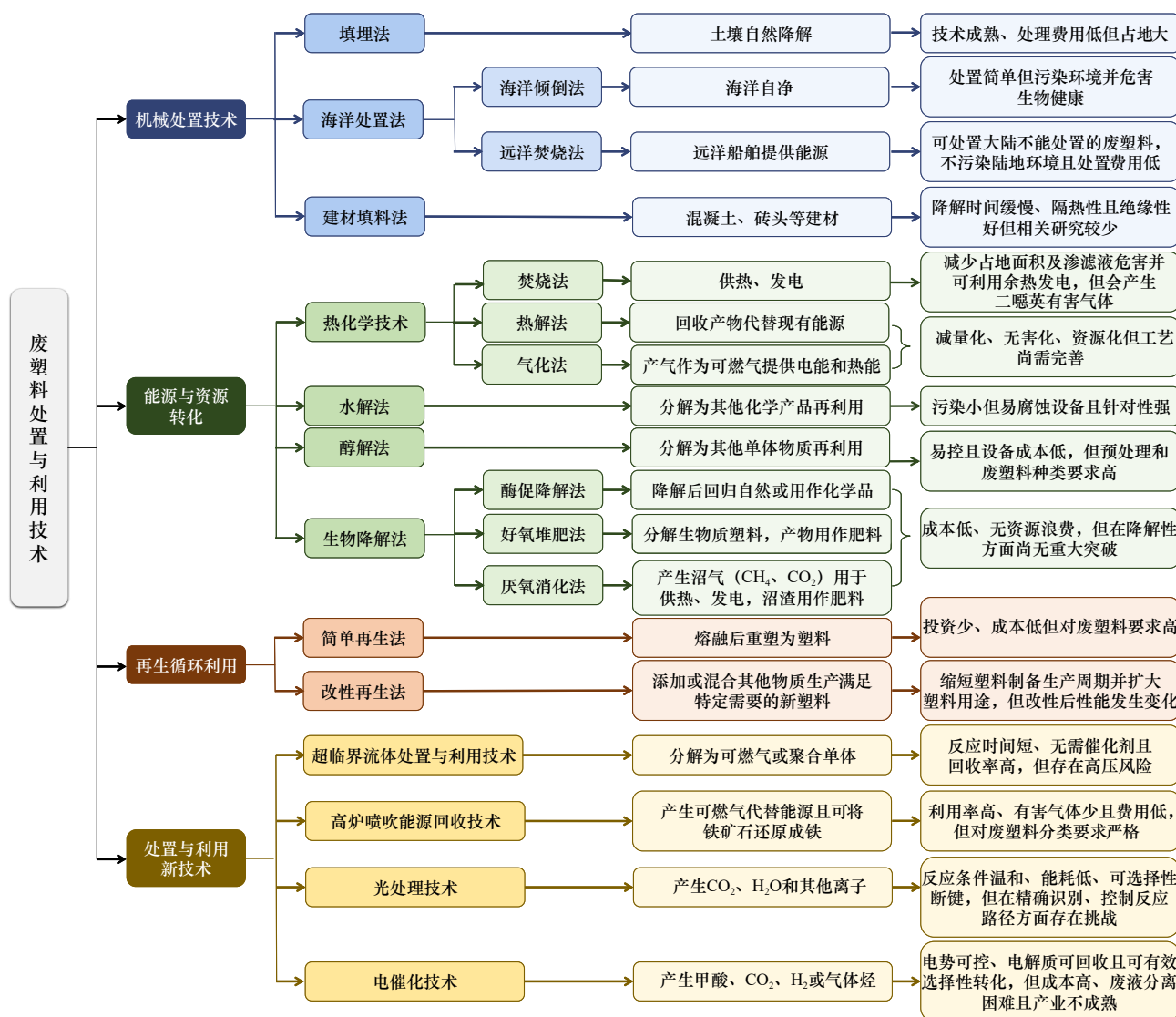


图1 废塑料处置与利用技术分类

政策规定方面需继续完善，对处置废塑料的种类、地域、技术等进行匹配优化。建材填料法虽然处于研发阶段，但在废塑料回收利用方面具有一定的发展前景。

(一) 填埋法

填埋处置将废塑料同其他垃圾一起混合投入垃圾填埋场，利用土壤中的微生物将垃圾自然降解；成本低、处理简单、收集时间短、无需复杂加工器械^[15]，一直是主要采用的垃圾处置技术。然而，废塑料在土壤中的自然降解过程需要数十年甚至上百年，同时占用大量土地资源，无法实现回收利用。通过自然降解，废塑料的有机组分产生CH₄、CO₂、

NH₃等气相产物以及硫化物、氯化物等化合物^[11,32]，其中的有害成分含量偏高，逸散到大气中易带来酸雨、温室气体及臭氧层孔洞等环境污染风险。

废塑料具有耐腐蚀性、耐老化性、难降解性，无法自然降解的剩余物质经过风吹日晒、物理沉降后形成微塑料或纳米塑料^[33]。这种尺寸小、比表面积大的微塑料，可随着渗滤液在地表或地下迁移^[34]，对环境、生物的危害性远高于普通废塑料^[11]。微塑料的吸附性可使土壤中的有机和无机化合物分布发生变化^[11]，不但造成周边土壤质量下降，也影响土壤理化性质，致使土壤环境恶化；伴随微塑料迁移产生水污染问题，严重影响生态健康。微塑料表面可吸附细菌、病原体，由生物摄入积累后在肠

道中损伤肠道黏膜^[35],甚至会破坏分泌系统引发疾病^[36]。目前,针对微塑料、纳米塑料的处置研究尚处于起步阶段。

考虑持续性的生态影响,填埋法不是理想的废塑料处置技术,也不符合绿色可持续发展原则。需针对废塑料填埋处置应用,提前开展生态环境影响评估并改进实施方案。例如,可生物降解的废塑料直接进行填埋处置,对于自然降解缓慢且存在环境风险的废塑料,宜选择其他方式进行处置。

(二) 海洋处置法

根据处置垃圾的成分,海洋处置法分为远洋焚烧法、海洋倾倒入海法:前者利用船舶焚烧炉将船舶废物带到远海后进行焚烧处理^[16],主要处置含氯有机废物,焚烧气体通过冷凝直接入海,可减小焚烧污染物对陆地居住环境的影响;后者将陆地上、船舶内产生的废物经由船舶或航空器等投入深海,利用海洋的自净能力和庞大容量来处置废物^[17]。

海洋倾倒入海法始于18世纪60年代,沿海国家是此类方法的主要利用国^[37]。我国最早记录的海洋清废活动是在1882年利用挖泥船疏浚吴淞外沙并将疏浚物倾倒入外海域^[37]。伴随时代发展,工业废弃及生活丢弃废塑料数量逐渐增加,海洋废塑料构成了海洋垃圾的主要部分(60%~80%,部分地方甚至有90%~95%),其危害逐步显现^[38]。全球海洋中的废塑料堆砌量达到 1.5×10^8 t且仍以 1.2×10^7 t/a的速度增长^[38],对海洋生物多样性产生不利影响并对环境带来严重污染。例如,废塑料投放到海洋中易被生物误食而引起生物呼吸和进食受阻,废塑料缠绕可导致生物行动困难^[39],塑料含有的重金属也会对生物产生危害^[40]。

随着工业化进程加快、国际贸易发展,海洋自净能力已难以适应废塑料的倾倒入海速度,因此发布有关海洋处置规定以遏制不利趋势成为世界性潮流。联合国大会关于海洋废弃物管理的第11.30号决议提出,高度关注海洋微塑料问题,倡导各国加强海洋废物管理^[41]。芬兰、马耳他采用《防止倾倒入海废弃物及其他物质污染海洋公约》,比利时、德国、希腊、爱尔兰、罗马尼亚采用《防止船舶污染海洋公约73/78》,将之作为管控海洋垃圾处理的法律条文。我国颁布《中华人民共和国环境海洋保护法》,对海洋倾倒入海废物种类作出严格限制^[42]。未来,我国

沿海地区需加强废塑料乱丢警示工作并提高回收效率,积极倡导废塑料勿入海洋;对航海船员进行培训以增强科学处置意识,实施严格管理以消除不适当的海洋倾倒入海情况。

(三) 建材填料法

废塑料具有降解时间缓慢、隔热性及绝缘性良好的特点,可作为建筑和道路修建的替代材料^[18,43]。废塑料的建材应用研究主要涉及建筑用塑料砖块、塑料混凝土、塑料铺路、利用塑料制作改性剂等。

有环保组织将废塑料用作建筑材料,在荷兰鹿特丹市的一条河边修建公园。美国By Fusion公司利用蒸汽压缩制成塑料砖块,相比传统砖块具有更好的硬度、耐压能力、耐火性能。匈牙利一家公司将废塑料粉末与水泥、水混合制成混凝土。荷兰一家公司研制利用少量废纸混合废塑料挤压形成的塑料杆用于建筑篱笆。

全球每年的沥青铺路可向大气排放 1.6×10^6 t CO_2 ^[44],而将废塑料进行替代应用可实现减碳效果。国内机构提出将塑料、橡胶等废弃物用作路面面层以下结构层填料的专利^[45]。荷兰一家公司发明利用废塑料瓶生产的路面铺设材料,相比沥青可承受温度范围更大、质量轻、施工期短,不会造成土壤污染。塑料铺设路面可设计为中空结构,内部空间用于市政管路铺设^[46]。

废塑料也可制成沥青改性剂,用于改善道路用混合料的性能。例如,利用热塑性聚合物来改变沥青硬度,可降低沥青的温度敏感性^[18]。

整体来看,废塑料用作建筑材料利于建立资源循环型社会,但相关技术的兼容性、可行性研究仍待规模化试验,也需加强应用推广以增加社会关注度^[43]。

三、废塑料能源与资源转化

20世纪60年代到20世纪末,能源和资源短缺问题得到普遍关注。随着可持续发展、循环经济等理念的提出,塑料产业快速发展,废塑料产量增多^[47],研究者转为关注废塑料的能源与资源利用。废塑料回收与处置主要以实现无害化、减量化以及能源或资源化利用为目的。以环境保护为目的的化学回收技术是代表性的能源与资源回收技术^[14],将

高分子废塑料聚合物分解为小分子化合物以实现二次回收利用^[48]。

(一) 热化学技术

1. 焚烧法

多数塑料制品中的树脂含量超过65%，在过剩空气中焚烧且温度达到800~1200℃后，80%以上的物质会氧化分解为小分子化合物，散发的热量可作为发电或供暖的热能来源^[4]，在很大程度上实现废塑料的无害化、减容化、能源化^[49]。焚烧法适用于多组分废塑料处理，具有成本低廉、效率高的特点^[50]，可替代煤炭作为补充能源。焚烧法可细分为两种：将废塑料直接燃烧获得热值，用于就地焚烧；废塑料经过粉碎、混入生石灰、干燥、加压固化成型等流程制成一定直径的固体燃料，便于运输且热值高^[51]。

一般认为，废塑料焚烧只产生CO₂和其他无机物组分。但研究表明，焚烧过程中产生的炉渣还会含有微塑料，大部分来自于PP焚烧^[50]，这些微塑料会随着炉渣处置与利用而释放到环境中；还会产生重金属（如铬、铅、汞）以及有毒有机污染物（如CO、多环芳烃（PAHs）、二噁英）^[52]，这些污染物具有急性或慢性毒性。PVC焚烧会产生氯化氢、硫化物等有毒气体^[53]，在大气中形成酸雨而对环境造成二次污染^[54]。控制温度和停留时间可减少有害气体排放，当炉温为1000~1200℃并延长停留时间，PAHs含量可达最小值^[50]。改进焚烧废塑料技术，使烟气、飞灰符合排放标准；合理处置炉渣，充分发挥潜在的经济价值；高效利用焚烧产生的热能，更好服务于生产生活。

2. 热解法

热解法是在高温无氧条件下使废塑料实现C—C主链和烯丙基链断裂、分子间氢转移、 β -裂解及自由基反应产生简单小分子物质且不可逆的热化学循环^[55-57]；有机化合物分解为可燃气、焦油、蜡、焦炭等，无机化合物保持不变，可视为代替天然气、石油基液体燃料的处置回收技术^[56,58]。废塑料热解可通过液压进料机将干燥的废塑料推进反应釜后加热产生热解气、热解油（经冷却系统冷却为液态油），不可冷凝的气体再回收用于加热反应釜，待热解结束再将反应釜中的残渣排出。

目前市场上主要流通的塑料种类有PE、PP、

PVC、PS、PET；其中PE、PP、PS使用量合计占比约为70%，因含有丰富的碳、氢元素而成为废塑料热解的主要研究对象^[59]。在730℃温度下，PE、PP、PS受热裂解产生35 wt%气体、48.4 wt%油、14.3 wt%残渣、2.2 wt%焦油，其中的高热值气体（50 MJ/kg）可作为煤炭的替代燃料。利用锥形喷动床反应器对聚烯烃进行热解，产物中含有69 wt%的商用高质量汽油（无需脱硫^[60]）；聚烯烃热解液体产物中的含烃化合物可用于生产基础化学品^[59]。利用HZSM-5沸石催化剂对废塑料进行热解，PE、PP、PS可经由催化重整来制取H₂^[57,61]。生物基PE、生物基PP可视为（催化热解过程中生产的）汽油、柴油等液态烃的替代原料^[9]。废塑料催化热解可降低能耗需求，采用催化剂以兼顾反应温度降低、产品质量改善。

热解为废塑料提供了无害且高效的处置方式，具有良好的性价比和转化效率。然而，废塑料种类的多样性使热解产物呈现多样化，目前尚无废塑料热解的大规模工业化应用案例。相关技术应用主要存在三方面问题：①相对于焚烧技术而言，废塑料热解的高值化利用成本偏高，需改进技术以降低成本；②废塑料需预先分类收集；③需进行针对性的热解处置以提高效率、改善环境影响，如热解过程会产生腐蚀性气体（PET产生对苯二甲酸（TPA）、苯甲酸（BA））和升华物质（PVC产生氯化物），导致设备腐蚀、产物品质下降进而可能危害环境^[57]。目前研究主要有利用催化剂催化PET热解、对PVC进行脱氯化氢/脱氯处理，再进行热解以产生高质量的油和气^[57]。

3. 气化法

气化法指在高温下固体或液体碳基原料与气化剂（如水蒸气、空气、O₂、CO₂）在载气环境中反应制取H₂、CO、CO₂以及低分子碳氢化合物（如CH₄、C₂H₄、C₂H₆）合成气。这些合成气作为可燃气提供热能和电能，也可通过进一步的甲烷化反应制备高品质天然气，从而将废塑料中丰富的碳氢元素转化为燃料能源^[12,62]。气化过程包括干燥、热解、氧化、还原反应4个阶段^[62,63]。高温等离子气化技术可使废塑料在高温下降低污染物排放，分解细菌、化学污染废物，有效回收富含H₂的合成气，研究预测这一方法获得的电力供应可为焚烧的10倍^[64]。

也要注意，废塑料在气化过程中产生可冷凝

的碳氢化合物（焦油，冷凝温度为180~300℃），将与灰尘混合附着在设备管壁等处^[62]。去除方法主要分为炉内处理技术和炉外处理技术（如水洗、热裂解、催化重整）。优化废塑料气化产生高质量合成气并降低焦油产率的方法有：调节温度、升温速率、停留时间，采用催化剂（如白云石、橄榄石、碱金属、镍基催化剂）^[65]。例如，利用Ni-Mg-Al-CaO作为催化剂，以一定比例对聚丙烯进行催化气化可产生70%的H₂^[66]；通过球磨仪预处理废塑料，可增加气化过程中H₂的产生量^[67]；对于混合废塑料，含PE混合物的产气量明显减少，含PS混合物的H₂、CO、CO₂产量增多，利用橄榄石催化混合废塑料气化产生的热值更高^[68]。在焦油处理新技术研发方面，通过稻壳生物炭上负载Ni、Ce用于微波催化焦油重整，实现1~100 g/Nm³浓度焦油的高效去除，900℃条件下的去除率大于98.21%，同时实现高于29.02%的净能量效益^[69]；基于Ni/TiO₂催化剂对焦油蒸汽进行光热重整，较热重整的转化效率显著提高（600℃光热重整实现90.1%的转化率，比热重整高16.3%），为焦油处理提供了新思路^[70]。

从资源回收利用角度看，废塑料催化裂解气化技术可得到汽油、石蜡等烃类产品；从环境效益角度看，废塑料催化裂解气化工艺在缺氧气氛下进行，抑制二噁英的产生量，也使多数重金属在热解气化过程中溶入灰渣而减少排放量^[71]。然而，大规模应用相关气化工艺仍存在障碍，突出表现在废塑料清洗及干燥等环节所需设备以及整个工艺流程的投资强度较高，而设备寿命偏短、处理湿废物能力有限、自动化需求较高、垃圾分类困难。

（二）水解法

水解法主要利用水、酸、烧碱、氢氧化物等，将PET、PLA、聚氨酯（PU）等聚酯型塑料分解为可再利用的小分子单体物质，被视为一种热解过程中产生有害气体的废塑料补充处置方法。例如，PA发生溶解或溶胀后，H⁺与底物羰基的C结合形成酮，和C—N键断裂产生的含有一COOH、—NH₂的低聚物（在H⁺的催化下）反应生成可回收的己二酸（AC）、己二胺（HMD），HMD与酸作用产生盐类^[72]；水可使PLA废塑料分子内酯键断裂，形成低聚物、乳酸单体，单体提纯后可重新聚合制备PLA，从而实现循环利用^[73]。PET是水解法的主要

应用对象，离子液体、尿素/ZnAl₂、金属盐、固体酸、金属氧化物、多氧酸盐等均可选择性催化PET酯键断裂，形成小分子单体物质以回收利用^[74]。

水解法分为中性、酸性、碱性3类水解方式。中性水解通常使用水或水蒸气，主要产生乙二醇（EG）、对苯二甲醇，因污染小而属环境友好型水解法，不足在于降解产物的纯度低。酸性、碱性水解利用无机酸碱溶液（如浓硫酸、NaOH、KOH）对废塑料进行水解，速率快、效率高，但溶剂浓度过高易造成设备腐蚀问题^[75]。目前，水解法用于废塑料处置的研究较少，有待深入开展。

（三）醇解法

醇解法利用醇催化分解聚合物，生成可利用的单体或小分子物质。常用的醇解剂有甲醇、乙醇、EG等^[20]。在实际应用中，将不同醇解剂与废塑料混合，经醇解、酯化、缩聚反应形成低分子聚合物和聚酯类物质（见图2）；醇解剂在过滤后可回收利用^[20]。

醇解法与水解法相似，产物生成可控且均匀，无需纯化和分离，设备成本低；但对废塑料预处理、品种均匀性、分解用试剂的要求高，不适合处理混合废塑料^[15]。醇解法相较水解方法更易操作，产生的物质也易分离，但相关研究较少，仍需进一步优化工艺。

目前，利用醇解法处置和回收废塑料的主要对象是PU、聚酯等。对于PU，主要利用EG分解产生多元醇；对于聚酯，主要利用甲醇分解产生对苯二甲酸二甲酯（DMT）、EG和其他单体（可用于重新制备聚酯）^[76]。

（四）生物降解法

生物降解法指废塑料在自然条件（如土壤、沙土）或特定条件（如堆肥化、厌氧消化、水性培养

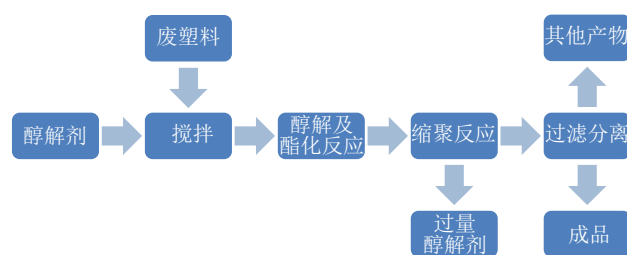


图2 废塑料醇解法的工艺流程

液)下,受微生物代谢活动作用而逐渐矿化并形成 CO_2 、 CH_4 、水等无机物的过程^[77]。利用生物系统处置可降解废塑料,成为近年来本领域的重要研究方向^[78]。随着各国“禁塑令”的实施,可生物降解塑料(如PLA、聚己二酸(PBAT))逐步替代传统塑料,可在微生物的作用下完全降解为 CO_2 和水^[79],进一步促进生物降解法在本领域的应用。生物降解法主要分为酶促降解法、好氧堆肥法、厌氧消化法。

1. 酶促降解法

酶促降解法指在生物酶的催化作用下,有机化合物(含部分有机高分子)中的化学键被破坏而发生降解反应的过程,是一种理想的废弃物处置与利用方法^[21]。酶促降解法主要用于两类塑料:①生物质塑料,利用淀粉、碳源等可再生资源,通过化学反应产生的不同的结构聚合物(如PLA、聚羟基烷酸酯(PHA)、聚丁二酸丁二醇酯(PBS));②以石油为主要原料的传统高分子塑料,如PET^[80]、PE^[81]等。微生物释放多种酶(如脂酶、解聚酶、酯酶、蛋白酶K、角质酶、脱水酶,见表1),可与废塑料表面特异性受体结合,催化高分子发生水解或氧化反应,形成脂肪酸或脂类等低分子物质,再由其他降解途径产生能量或新的生物质^[78]。

对于具有良好生物降解性的可生物降解塑料(如PLA),可采用特定的酶进行降解以达到优化的处置效果。黑曲霉脂肪酶、柱状念珠脂肪酶^[82]、碱性蛋白酶^[83]等对PLA降解效果显著,然而成本偏高、不便推广。对于具有微生物降解潜力的传统石油基塑料(如PET、聚己内酯(PCL)),可通过微生物菌株产生的特定酶来进一步转化为可用产品^[78],缓解对环境的污染和危害。链霉菌、放线菌科链霉菌^[81]、昆虫肠道中筛选出的肠杆菌^[84]等,对PET、PE有一定的降解效果。特定的细菌、真菌等微生物产生的酶,可降解PE、PVC等产生可用产品^[81],

适宜的添加剂将进一步提高塑料的酶促降解率^[85];但酶对传统塑料的降解速度缓慢,可用物质的回收效率较低,使用添加剂可能加重环境污染,因而酶促降解法处置废塑料不适合实时工业应用^[86]。

2. 好氧堆肥法

好氧堆肥指在富氧条件下由好氧菌对废物进行吸收、氧化、分解的过程。传统石油基塑料(如PP、PE)稳定且难降解,在好氧堆肥条件下可历时千年^[87]。针对PE^[88]、PP^[89]、PVC^[90]、可降解塑料袋(由淀粉、PCL制成)^[91]、PLA^[90]进行好氧堆肥降解,PP、PE除颜色略微改变外并没有发生分解,可降解塑料袋、PLA则明显发生分解。一般认为,好氧堆肥法多用于可降解塑料(如PLA、淀粉基塑料、PCL、PHA)的处理与处置^[22]。

可降解塑料在好氧堆肥条件下有一定的降解性,但在较低的温度(如家庭堆肥)下PLA等生物塑料能够抵抗微生物的“攻击”。因此,可降解塑料的堆肥处理通常在50~60℃的工业堆肥条件下进行^[92]。堆肥系统中的微生物菌群协同作用将促进可降解塑料的分解,如在58.2℃的堆肥过程中,PBAT-PLA塑料袋主要通过多种放线菌的协同代谢进行分解^[93]。可以认为,好氧堆肥是可降解类废塑料在使用寿命结束后的良好处置方式^[94]。

3. 厌氧消化法

厌氧消化法指厌氧细菌、古菌在无氧环境下分解有机物的过程,作为主要产物的沼气(由 CO_2 、 CH_4 组成)用于供能和发电,沼渣则用作肥料^[23]。通过厌氧消化处置有机固废受到重点关注^[95],如针对木质纤维素类、餐厨垃圾、污泥等有机固废厌氧消化工艺条件优化及调控的研究众多^[96]。鉴于PLA、PCL、PHA制成的塑料具有生物可降解性,采用厌氧消化法处理可降解塑料成为研究热点^[97]。

可降解塑料通过厌氧消化处置可产生沼气,但不同的可降解塑料在厌氧消化系统中表现出的生物

表1 促进废塑料降解的典型微生物酶

废塑料类型	废塑料名称	典型微生物酶
石油基塑料	PET	黑曲霉、枯草芽孢杆菌、放线菌、绳状青霉真菌、链霉菌
	PE	土曲霉菌、锡多曲霉、肠杆菌、假单胞菌、短芽孢杆菌、纤维素微球、溶杆菌、镰刀菌属
生物降解塑料	PLA	黑曲霉脂肪酶、柱状假丝酵母、皱褶念珠菌
	PCL	半知菌、曲霉菌、青霉菌
	PBS	脂肪酶、角质酶

降解性不尽相同。相较于 PLA、PBAT、PCL, PHA 的降解效果更好^[98]。厌氧消化工艺条件也将直接影响可降解塑料处置, 如温度、碳氮比、时间、材料形态、预处理条件等; 适当提高处理温度^[99]、氨氮浓度^[100]可显著提高 PLA 塑料的降解率^[101], 预处理也可增加 PLA^[102]和 PHA^[103]塑料的沼气产量。在众多的废塑料处置方法中, 厌氧消化与预处理相结合是实现可降解塑料安全清洁处置的有效形式, 尽管预处理方法、处置条件等仍需深入研究和继续优化。

四、废塑料再生循环利用

塑料根据物理性质可分为热塑性塑料、热固性塑料: 前者在高温下可融化成液体, 再根据要求制作成不同形状的物品, 可回收后重复塑型; 后者不能融化及重塑, 只能加工成硬塑料物品并一次性使用, 加热会使其硬度增加^[14]。热塑性塑料主要进行资源、能源的回收利用, 热固性塑料仅作能源回收以避免浪费^[104]。

(一) 简单再生法

简单再生指不经改性, 将回收的废塑料经分拣、清洗、粉碎、熔融、再造, 直接用于塑料成型加工的技术, 成本低、投资少, 但对可加工塑料的品类有要求。简单再生法几乎适用全部的热塑性废塑料、少量混有热固性塑料的废塑料, 主要分为 3 种处置类型: ① 来自塑料加工厂、树脂生产厂在生产过程中产生的边角料, 材料通常干净且成分单一, 无需分拣即可直接破碎并塑化成型; ② 来自回收的废塑料, 如各种包装材料、薄膜等, 材料需要经过分拣、清洗、破碎后塑化成型; ③ 来自特殊用途塑料产生的废塑料, 如电缆护套等需进行特殊的预处理才能再利用, 经溶解、沉淀、干燥后重用或与其他聚合物共混; 在化学品制取聚酯过程中加入废塑料一起反应, 如对苯二甲酸 (TPA)、EG 制取聚酯过程中可加入废塑料^[105]。

(二) 改性再生法

改性再生法相较于简单再生法更为复杂, 在将废塑料通过化学或机械过程进行改性后, 再以不同材料混合或加入添加剂的方式生产满足特定需要的新型塑料; 能够提高再生料的基本力学性能, 满足高

质量专用制品的生产需求^[15]。废塑料改性包括共混改性、增强改性、填充改性、增韧改性、接枝改性等多种, 可按物理改性、化学改性进行粗分^[15]。改性再生法多为中小型企业采用, 主要消耗工矿企业及农业产生的废塑料 (如塑料零部件、包装品、农药瓶、食品袋、日用品)。这类废塑料中含有少量的填充料及增塑剂, 稍经加工即可提高分子量以有利再利用。例如, 利用扩链剂将 ABS 中羧基与聚丁二烯的端羟基进行原位扩链以实现聚合物改性利用^[105]; 将 PS 进行脱溴处理后利用改性共混工艺方法实现 PS 造粒以提升其物理性能并升级废塑料回收利用技术^[106]; 利用共混方法去除工业生产聚碳酸酯中的双酚 A 以实现聚合物膜表面改性并达到产品正常使用需求^[107]。

社会对塑料制品的需求量逐年增长, 不仅消耗大量能源, 而且产生环境污染、危害生物健康。在此背景下, 通过改性再生法实现废塑料循环利用也属适应低碳经济的发展方式, 需针对性管控加工企业环保安全, 致力减轻环境污染问题, 追求全面协调的可持续发展^[108]。改性再生技术可导致各类废塑料产生性能变化, 如 PE、PP、PVC、PS、ABS、PA 在再生过程中均会发生颜色变化, 出现粘度、伸长率下降等现象, 而高密度 PE 的粘度将上升^[109,110]。因此, 废塑料再生技术对再生塑料的性能变化有利有弊, 可补充添加剂或进行技术调整以保证产品质量。

五、废塑料处置与利用新技术

(一) 超临界流体处置与利用技术

超临界指在特定温度、压力下, 溶剂介于液体和气体之间的一种状态。溶剂兼具液体和气体两种性质, 多为 CO₂、水、甲醇等^[111]。超临界技术将废塑料放入某种装有特定流体的密闭容器中进行反应, 在 PU、聚酯等极性废塑料分解方面具有显著优势^[24]; 将废塑料中的有机物转化为 H₂、CO、烃类等可燃气体^[25], 或将高分子废塑料快速、环保地分解为聚合单体或低聚物^[26]。PET 在超临界水中可分解为 TPA、EG, 产品纯度超过 95%^[111]; 在温度为 573 K、停留时间为 30 min、压力达到 8 MPa 时, PET 即可完全分解为对 DMT、EG^[112]。

废塑料在超临界流体中进行反应, 具有反应时

间短、无需催化剂、回收率高等优点。废塑料具有醚键、酰键、酯键等易分解的化学键，能够在超临界流体中分解为单体，再经重组来生产塑料新品。PET在超临界流体中可分解为单体^[113]，也可利用超临界流体分解技术回收PU^[111]。超临界流体分解技术发展前景良好，但在使用时存在高压密封要求高问题。

(二) 高炉喷吹能源回收技术

利用高炉喷吹进行能源回收被普遍认为是行之有效的废塑料回收方法。废塑料作为高分子碳氢化合物，碳氢含量与重油相近；具有很好的燃烧性能和热值，发热量与重油相当（高于煤粉），适合作为高炉炼铁的还原剂和发热剂；尤其是塑料中的硫、灰分含量低，适应高炉冶炼过程，利于提高铁水质量^[26,27]。将废塑料代替焦炭或煤粉作为原料，制成适宜的颗粒喷入高炉，产生CO、CO₂、H₂、CH₄等气体；废塑料利用率高，产生的有害气体少，综合处理费用低。需进行预处理，将废塑料清洗、晾干后按照不同等级（如塑料薄膜类、热固型类）进行分类后再制粒，用于高炉喷吹^[27]。喷吹进入高炉的废塑料颗粒，在炉内高温和还原气氛下被气化成H₂、CO；这些气体随热风上升，作为还原剂将铁矿石还原成铁。

从能源利用角度看，高炉喷吹技术对废塑料蕴含能源的利用率较高（约80%），主要以化学能形式还原铁矿石。从环境保护角度看，高炉喷吹技术产生的有毒气体（如二噁英、呋喃）含量较低，便于规模化应用。高炉喷吹技术的处理能力较强，利于发展低碳循环经济^[114]。然而，回收的废塑料通常并未进行全面分类，不符合高炉喷吹对反应物质的要求，导致高炉喷吹技术目前未能广泛使用；未来可加大垃圾分类实施力度，促进相关技术的推广使用。

(三) 光处理技术

光处理技术利用光能作为能量源来处理废塑料，污染小且具经济优势，近年来备受关注^[115]。相较热化学技术，光反应条件温和、能源消耗低，可精确断裂特定化学键以实现目标产物的高选择性^[116]。光处理技术主要分为光降解、光催化两类。

光降解的机理包括单线态氧诱导氧化^[117]、自由

基引起氧化^[118]。单线态氧氧化机理指单线态氧与聚合物直接发生反应。自由基氧化机理分为链引发、链增长、链终止3个阶段。链引发阶段是聚合物光降解的关键过程^[119]，而反应引发的前提是具备一种或数种显色基团^[120]，如羰基、不饱和键、聚合物制备过程的添加剂（光引发剂、颜料等）^[117]。光降解技术在海洋微塑料^[121]、一次性包装材料、农用薄膜等的处置方面展示出良好前景^[122]，带动了可光降解塑料研发制备方向的较多研究^[123]。

光催化指在光催化剂中进行光化学反应的过程，较多使用半导体吸收光以加速光反应^[124]；通常包含3个基本过程：光子吸收和激发催化剂表面产生电子-空穴对（光生载流子），光生载流子分离及迁移，光生载流子与聚合物发生氧化还原反应。按照目标产物的种类，光催化可分为光催化降解、光催化重整^[2]。①光催化降解直接利用太阳能，在温和环境压力及温度条件下将废塑料转化为CO₂和水^[28]。但在有氧条件下会产生羟基自由基等高氧化性自由基，导致非选择性氧化反应。废塑料在反应过程中被分解为复杂碎片（如微塑料、纳米塑料）^[125]，伴生的温室气体、中间残留物等会对环境造成负面影响。②光催化重整将废塑料作为富含碳、氢的高价值资源，具有显著的经济优势、较高的原子经济性。通过光催化重整可生产燃料（如H₂^[29]）、化学品（如乙烯、丙烯^[126]、醋酸^[127]）、功能性材料（主要指C—H功能化^[11]、金属纳米颗粒^[115]）。

光处理技术虽然应用前景良好，但是存在有待解决的问题，如探索精准识别和控制反应路径的方法，研发低成本、高性能的光催化剂，根据不同类型废塑料开发经济且环境友好的预处理方法。

(四) 电催化技术

电催化与光催化类似，也是可用于废塑料清洁处置与循环利用的方法，细分为电催化H₂析出、电催化O₂析出、电催化CO₂还原、电催化N₂固定^[128]。应用可再生能源（如太阳能、风能、水能），通过电重整将废塑料资源价值化，产生含碳燃料和化学品^[128,129]。通过两个电极分别连接外部电路与电解质，在温和条件下，阴极发生还原反应以从H₂O生成H₂，阳极的废塑料发生氧化反应以产生可回收利用的能源产品^[129]。PET在碱性电解液（如KOH）中分解为TPA、EG等化学品后，再经两极电催化

可产生甲酸^[128]；将PET、CO₂作为两极，经电催化产生甲酸^[130]。利用稀硝酸将PE分解得到二羧酸后，经电催化转化为气态烃以及H₂、CO₂等副产品^[126]。

目前，有关废塑料经电催化转化为有价值产品的应用研究仍然较少。电催化技术尽管具有能源电势可控、电解质可回收、可选择性转化的优点^[128]，但面临诸多应用挑战：实验生产装置向工业化应用转换存在困难，从电解液中分离有机酸、氧化还原物质的过程耗能高，需要更高效、更环保、更经济的催化剂^[128,129]。

六、废塑料处置与利用技术发展建议

发达国家在废塑料回收利用技术方向发展较早，也有相对成熟的应用系统，相关经验值得总结和借鉴。日本针对塑料企业发布专门生产要求，如对于PET瓶，规定不使用底杯和把手、禁止着色、使用可物理剥除的标签及塑料瓶盖等；企业需将废塑料投入生产以形成资源闭环^[131,132]。美国拥有废塑料再生企业超过1700家，美国塑胶工业协会提出了利用塑料类型进行标签分类的办法以便废塑料回收，美国国家航空航天局开展了利用卫星遥感识别海洋中废塑料的相关研究；要求位于沿海地区的能源公司对在外大陆架作业的员工进行塑料制品使用培训，面向社会倡导志愿者在沿海地区清除废塑料^[133]。欧盟的一些国家建立了较为全面的家用废塑料包装回收办法，发布了包装生产商需向回收商支付一定费用或者由包装生产商负责回收及处理等政策^[134]。

我国也在废塑料回收处理方面积极行动。2008年开始实行“限塑令”，遏制了塑料产量的快速增长势头。2019年实行垃圾分类制度，鼓励拥有完善技术及装备的废塑料回收再利用企业发展，提高了废塑料的回收利用率。《“十四五”循环经济发展规划》（2021年）要求，合理推进塑料源头减量，因地制宜、积极稳妥推广可降解塑料，加强废塑料分类回收利用，减少废塑料垃圾填埋量。然而，面向循环经济、绿色低碳的发展目标，现有的废塑料处置与利用技术体系面临严峻挑战。一些较为成熟的技术（如填埋、焚烧），其处理过程（散发微塑料、污染物等）对环境健康的影响仍有一定的不可控性，加之资源与能源浪费、运输过程损耗，仍构成长期挑

战。正在发展中的能源与资源化利用技术具有应用针对性（与再生循环利用技术类似），更依赖废塑料的回收分类，在处置利用过程中亦存在污染物控制、产物调控、效率提升方面的挑战，产出的再生塑料面临认可度低的难题。对于新兴技术，从研发到应用仍需深入探索，待技术攻关、成果转化、商业推广完成后才能真正发挥预期价值。为此，应对未来挑战，提出在技术与产业发展方面的建议。

一是从源头减量并鼓励再生塑料使用。采取政策驱动的方式，鼓励商品包装选择可生物降解塑料等替代品，减少一次性难降解塑料的消费使用量，致力从源头减少废塑料产量。制定再生塑料相关标准体系，规范废塑料回收及再生利用，提高再生塑料的公众认可度以及废塑料的循环利用率。塑料产品生产单位需掌握对应类型塑料的基本特性及处理方式，据此向末端回收处理环节提供精准的处理建议。

二是加强废塑料分类回收力度。我国的废塑料处置与利用发展较晚，有关回收与管理机制仍不健全。公众环保意识尚未转变成行为习惯，对垃圾分类重要性的认识较为薄弱。需强化有关垃圾分类回收政策的执行与宣传力度，切实推动废塑料分类回收的产业化。可采取监督或鼓励式分类回收执行办法，因地制宜使用考核或荣誉评分等方式增强公众意识与习惯培养。再生塑料生产单位与回收单位之间可建立紧密联系，以定点合作等方式深化回收再利用。

三是推动技术创新与成果转化。废塑料处理新技术尚不成熟，相比成熟技术短板突出，需在废塑料处置与利用研究布局中给予必要支持，促进关键技术难题突破。围绕废塑料的全链条，强化基础教育、扶持青年团队，开展国际交流、引进高端人才，逐步构建领域专业人才梯队；加强“产学研”协同，开展前瞻性探索与有效性验证。以公共资金投入带动企业参与技术研究的积极性，注重应用需求牵引基础研究，推动废塑料处理利用创新技术成果的顺畅转化。构建塑料生产、分类回收、末端处理产业链，加强示范性、引领性案例研究，促进行业推广和应用。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: November 23, 2022; **Revised date:** March 13, 2023

Corresponding author: Chen Guanyi is a professor from Tianjin University of Commerce. His major research field is clean disposal and energy use of biomass solid waste. E-mail: chen@tju.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Advisor Research on New Methods for Separate Disposal and Resource Utilisation of Villages Household Waste in Yunnan Province” (2022YNZH3); National Natural Science Foundation of China project (52100156, 52176197)

参考文献

- [1] Chang S H. Plastic waste as pyrolysis feedstock for plastic oil production: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 877: 162719.
- [2] Chu S, Zhang B, Zhao X, et al. Photocatalytic conversion of plastic waste: From photodegradation to photosynthesis [J]. *Advanced Energy Materials*, 2022, 12(22): 1–10.
- [3] United Nations Environment Programme. From pollution to solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution [EB/OL]. (2021-10-21)[2023-02-15]. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>.
- [4] Bergmann M, Almroth B C, Brander S, et al. A global plastic treaty must cap production [J]. *Science*, 2022, 376(6592): 469–470.
- [5] 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.
- [6] China Business Industry Research Institute. Rubber and plastic products industry data [EB/OL]. (2022-01-20)[2023-02-15]. <https://s.askci.com/data/economy/00024/>.
- [7] OECD. Global plastics outlook: Economic drivers, environmental impacts and policy options [EB/OL]. (2022-02-22)[2023-02-15]. <https://finance.sina.com.cn/esg/ep/2022-03-22/doc-imcwjwss7342974.shtml>.
- [8] Ahamed A, Veksha A, Giannis A, et al. Flexible packaging plastic waste-environmental implications, management solutions, and the way forward [J]. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2021, 32: 100684.
- [9] Zhi Z. What more can we do to prevent plastic waste from entering the sea? [EB/OL]. (2018-07-18)[2023-02-15]. <https://cn.weforum.org/agenda/2018/07/17fede38-2084-488f-9c06-0a472908c100>.
- [10] 钱秀娟, 刘嘉唯, 薛瑞, 等. 合成生物学助力废弃塑料资源生物解聚与升级再造 [J]. *合成生物学*, 2021, 2(2): 161–180.
Qian X J, Liu J W, Xue R, et al. Synthetic biology boosts biological depolymerization and upgrading of waste plastics [J]. *Synthetic Biology Journal*, 2021, 2(2): 161–180.
- [11] Cherubini F, Bargigli S, Ulgiati S. Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration [J]. *Energy*, 2009, 34(12): 2116–2123.
- [12] Song J X, Sun K, Huang Q X. The effect of thermal aging on the composition of pyrolysis oil fuel derived from typical waste plastics [J]. *Fuel Processing Technology*, 2021, 218: 106862.
- [13] Hu S C, Ma X Q, Lin Y S, et al. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of paper mill sludge and municipal solid waste [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 99: 112–118.
- [14] 宋丽, 周建军, 张鹏. 环境保护工程中废弃塑料处理技术 [J]. *山西化工*, 2021, 41(3): 229–230.
Song L, Zhou J J, Zhang P. The treatment technology of waste plastics in environmental protection engineering [J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2021, 41(3): 229–230.
- [15] 范炜亮, 王克俭. 塑料包装废弃物的回收利用 [J]. *塑料包装*, 2021, 31(1): 53–57.
Fan W L, Wang K J. Recovery and utilization of plastic packaging waste [J]. *Plastic Packaging*, 2021, 31(1): 53–57.
- [16] 郭毅, 于春令, 王磊, 等. 船舶固体垃圾处理方法及对策研究 [J]. *中国水运*, 2010, 10(6): 74–76.
Guo Y, Yu C L, Wang L, et al. Study on treatment methods and countermeasures of ship solid waste [J]. *China Water Transport*, 2010, 10(6): 74–76.
- [17] 陈新恩. 远洋船舶垃圾处理技术的研究 [J]. *广州航海学院学报*, 2013, 21(4): 5–7.
Chen X E. Research of the technology for dealing with shipping waste [J]. *Journal of Guangzhou Maritime College*, 2013, 21(4): 5–7.
- [18] Celauro C, Teresi R, Graziano F, et al. Preliminary evaluation of plasmix compound from plastics packaging waste for reuse in bituminous pavements [J]. *Sustainability*, 2021, 13(4): 2258.
- [19] Rahman M H, Bhoi P R. An overview of non-biodegradable bioplastics [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 294: 126218.
- [20] 闭贤凤. 废塑料资源化利用技术进展 [J]. *科技创新与应用*, 2019 (23): 156–157.
Bi X F. Waste plastics resource utilization technology progress [J]. *Technology Innovation and Application*, 2019 (23): 156–157.
- [21] 程若瑶. 微生物对塑料的降解 [J]. *化工管理*, 2020 (5): 101–102.
Cheng R Y. Degradation of plastics by microorganisms [J]. *Chemical Enterprise Management*, 2020 (5): 101–102.
- [22] Guillaume S M. Sustainable and degradable plastics [J]. *Nature Chemistry*, 2022, 14(3): 245–246.
- [23] Al-Salem. *Plastics to energy: Fuel, chemicals, and sustainability implications* [M]. Amsterdam: Elsevier Inc., 2019.
- [24] Goto M. Subcritical and supercritical fluid technology for recycling waste plastics [J]. *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 2016, 59(6): 254–258.
- [25] Liu Y G, Fan C, Zhang H, et al. The resource utilization of ABS plastic waste with subcritical and supercritical water treatment [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(30): 15758–15765.
- [26] 常凤. 塑料的产量、性质与高炉喷吹技术 [C]. 贵阳: 2019年全国高炉炼铁学术年会, 2019.
Chang F. Plastics production, properties and blast furnace injection technology [C]. Guiyang: 2019 National Blast Furnace Iron-making Academic Annual Conference, 2019.
- [27] 侯明. 高炉喷吹废塑料下的废旧塑料综合利用新方法 [J]. *资源节约与环保*, 2021 (5): 119–120.
Hou M. New method for comprehensive utilization of waste plastics under waste plastics injection in blast furnace [J]. *Resources Economization & Environment Protection*, 2021 (5): 119–120.
- [28] 张妍, 吴迪, 李晨, 等. 半导体掺杂促进塑料可光降解性能的研究

- 究进展 [J]. 应用化工, 2020, 49(5): 1274–1277.
- Zhang Y, Wu D, Li C, et al. Progress in research on photodegradation of plastics by semiconductor doping [J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(5): 1274–1277.
- [29] 陈欢, 万坤, 牛波, 等. 废弃塑料化学回收及升级再造研究进展 [J]. 化工进展, 2022, 41(3): 1453–1469.
- Chen H, Wan K, Niu B, et al. Recent progresses in chemical recycling and upcycling of waste plastics [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(3): 1453–1469.
- [30] Jiao X C, Zheng K, Chen Q X, et al. Photocatalytic conversion of waste plastics into C₂ fuels under simulated natural environment conditions [J]. Angewandte Chemie–International Edition, 2020, 59(36): 15497–15501.
- [31] Lewis S E, Wilhelmy B E, Leibfarth F A. Organocatalytic C–H fluoroalkylation of commodity polymers [J]. Polymer Chemistry, 2020, 11(30): 4914–4919.
- [32] Pathan S I, Arfaioi P, Bardelli T, et al. Soil pollution from micro- and nanoplastic debris: A hidden and unknown biohazard [J]. Sustainability, 2020, 12(18): 7255.
- [33] 张姗姗, 王洋清, 赵由才, 等. 垃圾填埋场中的塑料–微塑料–纳米塑料环境行为研究前瞻 [J]. 环境卫生工程, 2021, 29(3): 58–68.
- Zhang S S, Wang Y Q, Zhao Y C, et al. Perspective of plastics–microplastics–nanoplastics environmental behavior study in landfills [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2021, 29(3): 58–68.
- [34] Zhang F, Zhao Y T, Wang D B, et al. Current technologies for plastic waste treatment: A review [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 282: 124523.
- [35] Rasool F N, Saavedra M A, Pamba S, et al. Isolation and characterization of human pathogenic multidrug resistant bacteria associated with plastic litter collected in Zanzibar [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 405: 124591.
- [36] Bläsing M, Amelung W. Plastics in soil: Analytical methods and possible sources [J]. Science of The Total Environment, 2018, 612: 422–435.
- [37] 陈东兴, 张亚峰, 陈亮鸿, 等. 国内外海洋倾废管理的比较与探讨 [J]. 环境保护, 2021, 49(19): 35–39.
- Chen D X, Zhang Y F, Chen L H, et al. A comparative exploration into the domestic and international management of the ocean dumping [J]. Environmental Protection, 2021, 49(19): 35–39.
- [38] 陈飞飞. 海洋塑料垃圾防治的国际法制现状、问题与建议 [D]. 济南: 山东大学 (硕士学位论文), 2020.
- Chen F F. Status, problems and suggestions of international legal system for prevention and control of marine plastic waste [D]. Jinan: Shandong University (Master's thesis), 2020.
- [39] 王慧卉, 梁国正. 塑料垃圾对海洋污染的影响及控制措施分析 [J]. 南通职业大学学报, 2014, 28(1): 68–72.
- Wang H H, Liang G Z. Study on effects of plastic pollution on marine environment and mitigations [J]. Journal of Nantong Vocational University, 2014, 28(1): 68–72.
- [40] Yue X H, Zhang F S, Zhang C C, et al. Upcycling of blending waste plastics as zwitterionic hydrogel for simultaneous removal of cationic and anionic heavy metals from aqueous system [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 432: 128746.
- [41] United Nations. United Nations convention on the law of the sea [EB/OL]. (2022-04-15)[2023-02-15]. <https://www.un.org/zh/documents/treaty/UNCLOS-1982>.
- [42] 中华人民共和国国务院. 中华人民共和国海洋倾废管理条例 [EB/OL]. (2017-03-01)[2023-02-15]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2017/content_5219141.htm.
- The State Council of the people's Republic of China. Regulations of the People's Republic of China on marine dumping management [EB/OL]. (2017-03-01)[2023-02-15]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2017/content_5219141.htm.
- [43] Abukhattala M, Fall M. Geotechnical characterization of plastic waste materials in pavement subgrade applications [J]. Transportation Geotechnics, 2021, 27: 100472.
- [44] 王瑞良. 用塑料废品建房铺路 [J]. 建筑工人, 2016, 37(2): 55.
- Wang R L. Building roads with plastic waste [J]. Builders' Monthly, 2016, 37(2): 55.
- [45] 姚战, 姚子豪, 郑康, 等. 一种环保高性能塑胶跑道及其施工方法: CN112030666A [P]. 2020-12-04.
- Yao Z, Yao Z H, Zheng K, et al. An environmentally friendly high performance plastic runway and its construction method: CN112030666A [P]. 2020-12-04.
- [46] Lu H Q, Kazarian S G. How does high-pressure CO₂ affect the morphology of PCL/PLA blends? Visualization of phase separation using in situ ATR-FTIR spectroscopic imaging [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 243: 118760.
- [47] Burlakovs J, Kriipsalu M, Porshnov D, et al. Gateway of land-filled plastic waste towards circular economy in Europe [J]. Separations, 2019, 6(2): 25.
- [48] 赵娟. 废塑料回收利用的研究进展 [J]. 现代塑料加工应用, 2020, 32(4): 60–63.
- Zhao J. Research progress on plastics waste recycling [J]. Modern Plastic Processing and Application, 2020, 32(4): 60–63.
- [49] 简敏菲, 饶丹, 孙望舒, 等. 生活垃圾热解焚烧灰渣中微塑料与重金属的潜在生态风险 [C]. 西安: 2019 中国环境科学学会科学技术年会, 2019.
- Jian M F, Rao D, Sun W S, et al. Potential ecological risks of microplastics and heavy metals in ash from pyrolysis and incineration of municipal solid waste [C]. Xi'an: Science and Technology Annual Meeting of Chinese Society of Environmental Sciences, 2019.
- [50] 杨占, 吕凡, 章骅, 等. 生活垃圾焚烧厂是塑料和微塑料的最终归宿吗? [J]. 环境卫生工程, 2020, 28(5): 95.
- Yang Z, Lyu F, Zhang H, et al. Is the domestic waste incineration plant the ultimate destination of plastics and microplastics? [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2020, 28(5): 95.
- [51] 张海雪. 特征元素对生物质与塑料共气化产气特性的影响 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学 (硕士学位论文), 2012.
- Zhang H X. Effects of characteristic elements on co-gasification characteristics of biomass and plastics [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University (Master's thesis), 2012.
- [52] Shen Y F, Zhao R, Wang J F, et al. Waste-to-energy: Dehalogenation of plastic-containing wastes [J]. Waste Management, 2016, 49: 287–303.
- [53] 轩书琴. 乙烯法聚氯乙烯生产中焚烧废气的处理 [J]. 中国氯碱, 2021 (2): 20–21.

- Xuan S Q. Treatment of waste gas from incineration in vinyl chloride production by ethylene process [J]. *China Chlor-Alkali*, 2021 (2): 20–21.
- [54] 孙小东, 曹鼎, 胡倩倩, 等. 废弃塑料的化学回收资源化利用研究进展 [J]. *中国塑料*, 2021, 35(8): 44–54.
Sun X D, Cao D, Hu Q Q, et al. Progress in chemical recovery and resource utilization of waste plastics [J]. *China Plastics*, 2021, 35(8): 44–54.
- [55] 周飞, 彭剑峰. 塑料热解制油技术研究进展 [J]. *塑料工业*, 2022, 50(6): 64–69.
Zhou F, Peng J F. Research progress in oil production by pyrolysis technology of plastics [J]. *China Plastics Industry*, 2022, 50(6): 64–69.
- [56] Li D, Lei S J, Wang P, et al. Study on the pyrolysis behaviors of mixed waste plastics [J]. *Renewable Energy*, 2021, 173: 662–674.
- [57] Kumagai S, Yoshioka T. Feedstock recycling via waste plastic pyrolysis [J]. *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 2016, 59(6): 243–253.
- [58] Qureshi M S, Oasmaa A, Pihkola H, et al. Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2020, 152: 104804.
- [59] Kusenbergh M, Zayoud A, Roosen M, et al. A comprehensive experimental investigation of plastic waste pyrolysis oil quality and its dependence on the plastic waste composition [J]. *Fuel Processing Technology*, 2022, 227: 107090.
- [60] Amutio M, Onaindi A, Lopez G, et al. Upgrading of tars from waste valorisation processes by hplc fractionation: Scale up from analytical to preparative [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2010, 21: 865–870.
- [61] Dyer A C, Nahil M A, Williams P T. Catalytic co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a route to upgraded bio-oil [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2021, 97: 27–36.
- [62] Ciuffi B, Chiaramonti D, Rizzo A M, et al. A critical review of SCWG in the context of available gasification technologies for plastic waste [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(18): 6307.
- [63] Lopez G, Artetxe M, Alvarez J, et al. Recent advances in the gasification of waste plastics: A critical overview [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 576–596.
- [64] Cudjoe D, Wang H. Plasma gasification versus incineration of plastic waste: Energy, economic and environmental analysis [J]. *Fuel Processing Technology*, 2022, 237: 107470.
- [65] Luque R, Lin C S K, Wilson K, et al. *Handbook of biofuels production: Processes and technologies* [M]. Amsterdam: Elsevier Inc., 2016.
- [66] Wu C F, Williams P T. A novel Ni-Mg-Al-CaO catalyst with the dual functions of catalysis and CO₂ sorption for H₂ production from the pyrolysis: Gasification of polypropylene [J]. *Fuel*, 2010, 89: 1435–1441.
- [67] Cagnetta G, Zhang K L, Zhang Q W, et al. Augmented hydrogen production by gasification of ball milled polyethylene with Ca(OH)₂ and Ni(OH)₂ [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, 13: 11.
- [68] Parrillo F, Ardolino F, Boccia C, et al. Co-gasification of plastics waste and biomass in a pilot scale fluidized bed reactor [J]. *Energy*, 2023, 273: 127220.
- [69] Li J, Jiao L G, Tao J Y, et al. Can microwave treat biomass tar? A comprehensive study based on experimental and net energy analysis [J]. *Applied Energy*, 2020, 272: 115194.
- [70] Chen G Y, Dong X S, Yan B B, et al. Photothermal steam reforming: A novel method for tar elimination in biomass gasification [J]. *Applied Energy*, 2022, 305: 117917.
- [71] Lamba P, Kaur D P, Raj S, et al. Recycling/reuse of plastic waste as construction material for sustainable development: A review [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(57): 86156–86179.
- [72] Negoro S, Shibata N, Kato D, et al. X-ray crystallographic and mutational analysis of the NylC precursor: Catalytic mechanism of autocleavage and substrate hydrolysis of nylon hydrolase [J]. *FEBS Journal*, 2023, 2: 16755.
- [73] 任永琳, 王达, 刘合, 等. 聚乳酸水解机理及水解性能改进方法研究进展 [J]. *石油化工*, 2022, 51(9): 1129–1136.
Ren Y L, Wang D, Liu H, et al. Progress in hydrolysis mechanism and hydrolysis performance improvement methods of polylactic acid [J]. *Petrochemical Technology*, 2022, 51(9): 1129–1136.
- [74] Wang Y Q, Zhang Y, Song H Y, et al. Zinc-catalyzed ester bond cleavage: Chemical degradation of polyethylene terephthalate [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 208: 1469–1475.
- [75] 徐丽洁, 刘豪杰, 薛瑞, 等. 多学科交叉助力废塑料生物法循环利用的研究进展 [J]. *化工进展*, 2022, 41(9): 5029–5036.
Xu L J, Liu H J, Xue R, et al. Interdisciplinary assistance for biological recycling of waste plastics [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(9): 5029–5036.
- [76] 靳爱民. 新的甲醇分解循环回收技术可以帮助解决塑料垃圾问题 [J]. *石油炼制与化工*, 2019, 50(12): 30.
Jin A M. New methanol decomposition recycling technology can help solve the plastic waste problem [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals* 2019, 50(12): 30.
- [77] Ali S S, Elsamahy T, Al-Tohamy R, et al. Plastic wastes biodegradation: Mechanisms, challenges and future prospects [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 780: 146590.
- [78] Amobonye A, Bhagwat P, Singh S, et al. Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 759: 143536.
- [79] Moshood T D, Nawanir G, Mahmud F, et al. Biodegradable plastic applications towards sustainability: A recent innovations in the green product [J]. *Cleaner Engineering and Technology*, 2022, 6: 100404.
- [80] Farzi A, Dehnad A, Fotouhi A F. Biodegradation of polyethylene terephthalate waste using streptomyces species and kinetic modeling of the process [J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2019, 17: 25–31.
- [81] Sangale M K, Shahnawaz M, Ade A B. Gas chromatography-mass spectra analysis and deleterious potential of fungal based polythene-degradation products [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 1599.
- [82] Lee S H, Song W S. Enzymatic hydrolysis of polylactic acid fiber [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2011, 164(1): 89–102.
- [83] Lee S H. Biodegradability of polylactic acid fabrics by enzyme

- hydrolysis and soil degradation [J]. *Textile Coloration and Finishing*, 2017, 29(4): 181–194.
- [84] Ren L, Men L, Zhang Z W, et al. Biodegradation of polyethylene by enterobacter sp. D1 from the guts of wax moth galleria mellonella [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(11): 1941.
- [85] Muhonja C N, Makonde H, Magoma G, et al. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya [J]. *PLoS One*, 2018, 13(7): e0198446.
- [86] Abraham J, Ghosh E, Mukherjee P, et al. Microbial degradation of low density polyethylene [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2017, 36(1): 147–154.
- [87] Moharir R V, Kumar S. Challenges associated with plastic waste disposal and allied microbial routes for its effective degradation: A comprehensive review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 208: 65–76.
- [88] Adamcová D, Vaverková M D, Masicek T, et al. Analysis of biodegradability of degradable/biodegradable plastic material in controlled composting environment [J]. *Journal of Ecological Engineering*, 2016, 17(4): 1–10.
- [89] Vaverková M D, Adamcová D. Degradation of biodegradable/degradable plastics in municipal solid-waste landfill [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2014, 23(4): 1071–1078.
- [90] Leejarkpai T, Suwanmanee U, Rudeekit Y, et al. Biodegradable kinetics of plastics under controlled composting conditions [J]. *Waste Management*, 2011, 31(6): 1153–1161.
- [91] Vaverková M D, Adamcová D, Kotovicová J, et al. Evaluation of biodegradability of plastics bags in composting conditions [J]. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 2014, 21(1): 45–57.
- [92] Garcia-Depraect O, Lebrero R, Rodriguez-Vega S, et al. Biodegradation of bioplastics under aerobic and anaerobic aqueous conditions: Kinetics, carbon fate and particle size effect [J]. *Biore-source Technology*, 2022, 344: 126265.
- [93] Ahmed J, Mulla M, Jacob H, et al. Polylactide/poly(ϵ -caprolactone)/zinc oxide/clove essential oil composite antimicrobial films for scrambled egg packaging [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2019, 21: 100355.
- [94] North E J, Halden R U. Plastics and environmental health: The road ahead [J]. *Reviews on Environmental Health*, 2013, 28(1): 1–8.
- [95] Meegoda J N, Li B, Patel K, et al. A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(10): 2224.
- [96] Anukam A, Mohammadi A, Naqvi M, et al. A review of the chemistry of anaerobic digestion: Methods of accelerating and optimizing process efficiency [J]. *Processes*, 2019, 7(8): 504.
- [97] Stagner J A. Methane generation from anaerobic digestion of biodegradable plastics—A review [J]. *International Journal of Environmental Studies*, 2016, 73(3): 462–468.
- [98] Calabro P S, Folino A, Fazzino F, et al. Preliminary evaluation of the anaerobic biodegradability of three biobased materials used for the production of disposable plastics [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 390: 121653.
- [99] 王峰. 超高温和高温厌氧条件下聚乳酸塑料的降解 [J]. *环境工程学报*, 2018, 12(1): 304–309.
Wang F. Polylactide biodegradation under thermophilic and hyperthermophilic anaerobic digestion condition [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(1): 304–309.
- [100] Wang F, Hidaka T, Oishi T, et al. Degradation characteristics of polylactide in thermophilic anaerobic digestion with hyperthermophilic solubilization condition [J]. *Water Science and Technology*, 2011, 64(11): 2135–2142.
- [101] Bernat K, Kulikowska D, Wojnowska-Baryla I, et al. Thermophilic and mesophilic biogas production from PLA-based materials: Possibilities and limitations [J]. *Waste Management*, 2021, 119: 295–305.
- [102] Benn N, Zitomer D. Pretreatment and anaerobic co-digestion of selected PHB and PLA bioplastics [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, 5: 1–10.
- [103] Hobbs S R, Parameswaran P, Astmann B, et al. Anaerobic codigestion of food waste and polylactic acid: Effect of pretreatment on methane yield and solid reduction [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019: 4715904.
- [104] 朱桂丹, 陕洁, 尹绚, 等. 塑料废弃物的管理及资源化利用 [J]. *广东化工*, 2021, 48(16): 170–172.
Zhu G D, Shan J, Yin X, et al. Management and resource utilization of plastic waste [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2021, 48(16): 170–172.
- [105] Ye Q, Li Z, Liu J, et al. Waste ABS plastics used in electrical packaging appliances: Regeneration and properties [J]. *Iranian Polymer Journal*, 2021, 30(5): 445–452.
- [106] Qin Y, Dong L, Lu H, et al. Debromination process of Br-containing PS of E-wastes and reuse with virgin PS [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 431: 128526.
- [107] Muhamad M S, Salim M R, Lau W J, et al. A review on bisphenol A occurrences, health effects and treatment process via membrane technology for drinking water [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(12): 11549–11567.
- [108] Liu J J, Hou Q D, Ju M T, et al. Biomass pyrolysis technology by catalytic fast pyrolysis, Catalytic co-pyrolysis and microwave-assisted pyrolysis: A review [J]. *Catalysts*, 2020, 10(7): 742.
- [109] Kumar S, Singh E, Mishra R, et al. Utilization of plastic wastes for sustainable environmental management: A review [J]. *ChemSusChem*, 2021, 14(19): 3985–4006.
- [110] Lahtela V, Hyvarinen M, Karki T. Composition of plastic fractions in waste streams: Toward more efficient recycling and utilization [J]. *Polymers*, 2019, 11(1): 69.
- [111] Alassali A, Aboud N, Kuchta K, et al. Assessment of supercritical CO₂ extraction as a method for plastic waste decontamination [J]. *Polymers*, 2020, 12(6): 1347.
- [112] Wang T, Liu X Y, Huang S H, et al. Modelling co-gasification of plastic waste and lignin in supercritical water using reactive molecular dynamics simulations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(49): 21060–21066.
- [113] Wang T, Xu J M, Liu X Y, et al. Co-gasification of waste lignin and plastics in supercritical liquids: Comparison of water and carbon dioxide [J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2022, 66: 102248.

- [114] 贾利军, 王冰, 孟淑敏. 高炉喷吹废塑料工艺技术探讨 [J]. 工业炉, 2015, 37(2): 19–22.
Jia L J, Wang B, Meng S M. Discussion on the technology of injecting waste plastics into blast furnace [J]. Industrial Furnace, 2015, 37(2): 19–22.
- [115] Chu S, Zhang B W, Zhao X, et al. Photocatalytic conversion of plastic waste: From photodegradation to photosynthesis [J]. Advanced Energy Materials, 2022, 12(22): 2200435.
- [116] 王佚婷. 光催化在有机合成反应中的应用研究进展 [J]. 中外能源, 2021, 26(6): 25–31.
Wang Y T. Research progress in application of photocatalysis in organic synthesis reactions [J]. Sino-Global Energy, 2021, 26(6): 25–31.
- [117] Yousif E, Haddad R. Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: Review [J]. Springerplus, 2013, 2: 398.
- [118] Bracco P, Costa L, Luda M P, et al. A review of experimental studies of the role of free-radicals in polyethylene oxidation [J]. Polymer Degradation and Stability, 2018, 155: 67–83.
- [119] Li J, Lam J C W, L W Z, et al. Occurrence and distribution of photoinitiator additives in paired maternal and cord plasma in a south China population [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(18): 10969–10977.
- [120] 张闵楠, 孙昱楠, 宋玉茹, 等. 光固化3D打印废塑料来源、处置技术和环境影响 [J/OL]. 环境科学, [2023-01-10]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202210351>.
Zhang H N, Sun Y N, Song Y R, et al. Sources, disposal technologies and environmental impacts of photocurable 3D printing waste plastics [J/OL]. Environmental Science, [2023-01-10]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202210351>.
- [121] Andradý A L. The plastic in microplastics: A review [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 119(1): 12–22.
- [122] 李茂东, 辛明亮, 史君林, 等. 老化环境下压力容器用塑料力学性能变化规律研究 [J]. 塑料工业, 2018, 46(1): 82–86.
Li M D, Xin M L, Shi J L, et al. Variation of mechanical properties of plastics used in pressure vessels under aging conditions [J]. China Plastics Industry, 2018, 46(1): 82–86.
- [123] 舒伟. 光降解塑料的降解原理及其应用 [J]. 印刷质量与标准化, 2011 (5): 8–11.
Shu W. Degradation principles and applications of photodegradation plastics [J]. Printing Quality & Standardization, 2011 (5): 8–11.
- [124] Lee Q Y, Li H. Photocatalytic degradation of plastic waste: A mini review [J]. Micromachines, 2021, 12(8): 907.
- [125] Andradý A L, Barnes P W, Bornman, J F, et al. Oxidation and fragmentation of plastics in a changing environment: From UV-radiation to biological degradation [J]. Science of the Total Environment, 2022, 851: 158022.
- [126] Pichler C M, Bhattacharjee S, Rahaman M, et al. Conversion of polyethylene waste into gaseous hydrocarbons via integrated tandem chemical-photo/electrocatalytic processes [J]. ACS Catalysis, 2021, 11(15): 9159–9167.
- [127] Jiao X C, Zheng K, Chen Q X, et al. Photocatalytic conversion of waste plastics into C₂ fuels under simulated natural environment conditions [J]. Angewandte Chemie-International Edition, 2020, 59(36): 15497–15501.
- [128] Zhou H, Ren Y, Li Z H, et al. Electrocatalytic upcycling of polyethylene terephthalate to commodity chemicals and H₂ fuel [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 4679.
- [129] Zheng K, Wu Yang, Hu Z X, et al. Progress and perspective for conversion of plastic wastes into valuable chemicals [J]. Chemical Society Reviews, 2023, 52(1): 8–29.
- [130] Wang J Y, Li X, Wang M L, et al. Electrocatalytic valorization of poly (ethylene terephthalate) plastic and CO₂ for simultaneous production of formic acid [J]. ACS Catalysis, 2022, 12(11): 6722–6728.
- [131] 陈祥. 日本制定“塑料资源循环战略”的原因及影响 [J]. 日本问题研究, 2019, 33(6): 29–41.
Chen X. The reason and influence of Japan’s “resource circulation strategy for plastics” [J]. Japan Problem Studies, 2019, 33(6): 29–41.
- [132] 环保技术国际智汇平台. 日本的海洋塑料污染政策 [EB/OL]. (2020-11-10)[2023-05-03]. https://www.sohu.com/a/430941644_99899283.
International Wisdom Platform for Environmental Technology. Japan’s marine plastic pollution policy [EB/OL]. (2020-11-10)[2023-05-03]. https://www.sohu.com/a/430941644_99899283.
- [133] Office of the Spokesperson. Actions to address plastic pollution [EB/OL]. (2022-02-28)[2023-05-03]. <https://www.state.gov/u-s-actions-to-address-plastic-pollution/>.
- [134] 石毅. 地球的一半, 各国治理塑料污染给了我们什么启发? [EB/OL]. (2020-08-05)[2023-05-03]. https://www.thepaper.cn/news-Detail_forward_8574415.
Shi Y. Half of the earth, countries to control plastic pollution gives us what inspiration? [EB/OL]. (2020-08-05)[2023-05-03]. https://www.thepaper.cn/news-Detail_forward_8574415.