

## 基于热解技术的废塑料高值转化研究进展

佟一博<sup>1</sup>, 凌江华<sup>1</sup>, 张海港<sup>1</sup>, 程玉祥<sup>1</sup>, 孙 闻<sup>1</sup>,  
多依丽<sup>1</sup>, 王 硕<sup>1</sup>, 王勇俊<sup>1</sup>, 刘海峰<sup>1,2</sup>

(1. 辽宁石油化工大学 低碳能源科学与技术研究院, 辽宁 抚顺 113001;  
2. 华东理工大学 国家能源煤气化技术研发中心, 上海 200237)

**摘 要:** 废塑料的污染治理与资源化循环利用问题已成为全球性挑战, 热解是实现废塑料化学回收与高值转化的重要技术路径。从技术发展和产业化视角, 综述了废塑料热解技术在基础研究、工艺开发和应用推广等方面的主要进展与挑战。分析了不同类型塑料的热解机理和不同热解技术, 归纳了主要热解工艺操作参数对目标产物分布特性的影响。总结了采用废塑料热解技术在制备液态燃料、富氢气体和低碳烯烃方面的成果, 并对热解技术产业化示范案例和未来发展进行了探讨。

**关键词:** 废塑料; 热解技术; 热解机理; 高值转化; 产业化

中图分类号: TQ514 文献标志码: A 文章编号: 2097-2547(XXXX)XX-001-15

## Research progress of high-value conversion of waste plastics based on pyrolysis technologies

TONG Yibo<sup>1</sup>, LING Jianghua<sup>1</sup>, ZHANG Haigang<sup>1</sup>, CHENG Yuxiang<sup>1</sup>, SUN Wen<sup>1</sup>,  
DUO Yili<sup>1</sup>, WANG Shuo<sup>1</sup>, WANG Yongjun<sup>1</sup>, LIU Haifeng<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Low Carbon Energy Science and Technology, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, Liaoning, China;  
2. National Energy Coal Gasification Technology Research and Development Center, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** The treatment of pollution caused by waste plastics and their recycling and resource recovery have become global challenges. Pyrolysis is a key technological approach for achieving the chemical recycling and high-value conversion of waste plastics. From the perspectives of technological development and industrialization, the major advances and challenges of fundamental researches, process developments and application promotions of waste plastic pyrolysis technologies were reviewed. The pyrolysis mechanisms of various types of plastics and different pyrolysis technologies were analyzed, and the effects of key operational parameters on the distribution characteristics of target products were summarized. The achievements of pyrolysis technologies for waste plastics in preparation of liquid fuels, hydrogen-rich gases and light olefins were summarized, and industrial demonstration cases and future developments of pyrolysis technologies were discussed.

**Keywords:** waste plastics; pyrolysis technologies; pyrolysis mechanisms; high-value conversion; industrialization

塑料是经聚合反应制得的高分子材料, 具有质轻、价廉、易加工和耐用等优点, 广泛用于包装、建材、电子、医疗器械和储能等领域。按照受热行为, 可将塑料分为热塑性和热固性塑料。热塑性塑料具有线性结构, 受热会软化熔融, 易于成型; 热固性

塑料则在熔融时固化并形成三维交联网状结构, 形状不可重塑<sup>[1]</sup>。其中, 聚乙烯(PE)是最常见的热塑性塑料之一, 按密度可分为高密度聚乙烯(HDPE)和低密度聚乙烯(LDPE)。聚丙烯(PP)具有较好的耐冲击性和耐化学腐蚀性, 常用于生产食品容器、吸

收稿日期: 2025-12-29; 修回日期: 2026-01-27。

基金项目: 国家自然科学基金(22508157); 辽宁省兴辽英才计划(XLYC2402013); 辽宁省自然科学基金博士启动项目(2025BSLH248)。

第一作者: 佟一博(2002—), 硕士研究生, 研究方向为烃类热解机理, E-mail: tongyibo@stu.lnpu.edu.cn。

通信作者: 张海港(1998—), 博士, 副教授, 研究方向为高温反应工程, E-mail: zhanghaigang@lnpu.edu.cn;

程玉祥(1998—), 博士, 讲师, 研究方向为低碳冶金, E-mail: chengyuxiang@lnpu.edu.cn;

刘海峰(1971—), 博士, 教授, 研究方向为能源化工, E-mail: hfliu@ecust.edu.cn。

管和瓶盖。聚氯乙烯(PVC)因耐火耐腐蚀,多用于生产管道、地板和窗框。聚苯乙烯(PS)广泛用于制造泡沫盒、餐具等包装材料。聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)具有透明度和韧性均较高等优点,多用于制造塑料瓶<sup>[2]</sup>。据国家新材料研究院(ACMI)石化新材料研究所统计,截至2025年底,国内PP粒料和PE的总产能已分别达到 $4939 \times 10^4$  t/a和 $3942.8 \times 10^4$  t/a,相较于2020年增幅分别为84.2%和75.9%。另据百川盈孚统计,国内PVC产能从 $2490 \times 10^4$  t/a(2018年)增长至 $3038 \times 10^4$  t/a(2025年),累计增长约22%<sup>[3]</sup>。此外,智研咨询发布的信息显示,2024年全国PS产能已接近 $700 \times 10^4$  t<sup>[4]</sup>。

由于日常生活中对塑料的巨大需求,在过去几十年中,塑料的全球产量呈指数增长。据统计,全球塑料总产量从不到 $200 \times 10^4$  t(1950年)增长至21世纪初的亿吨级<sup>[5]</sup>。欧洲塑料协会报告指出2023年全球塑料总产量已达到 $4.138 \times 10^8$  t<sup>[6]</sup>。联合国环境规划署的公开数据显示,2024年全球塑料消费量

已突破 $5 \times 10^8$  t<sup>[7]</sup>。废塑料作为一种常见固体废弃物,其来源非常广泛。中国产业研究院《2025—2030年中国废塑料行业深度调研及发展前景预测报告》指出,2022—2024年我国废塑料行业供给规模持续增长,反映出我国作为塑料生产与消费大国之一,废塑料产生量仍保持高位运行<sup>[8]</sup>。2022—2024年中国废塑料行业供给量和不同处理方式供给量见图1<sup>[8]</sup>。从处理方式看,2022年与2024年相比,填埋量由 $1335 \times 10^4$  t减小至 $1284 \times 10^4$  t,焚烧总量从 $2865 \times 10^4$  t增大至 $2908 \times 10^4$  t,回收量从 $1800 \times 10^4$  t增长至 $1906 \times 10^4$  t。废塑料处置不当不仅会加剧“白色污染”,还会浪费其富含的碳氢资源。在全球加快“脱碳”的进程中,废塑料资源化利用不仅能减轻环境压力,还能促进石化资源的可持续利用,助力“双碳”目标实现。与简单的物理再生方式相比,废塑料化学资源化利用通过改变聚合物分子结构,将废塑料转化为高附加值化学品,实现了碳氢资源的高效回用,具备更好的经济和环境效益。

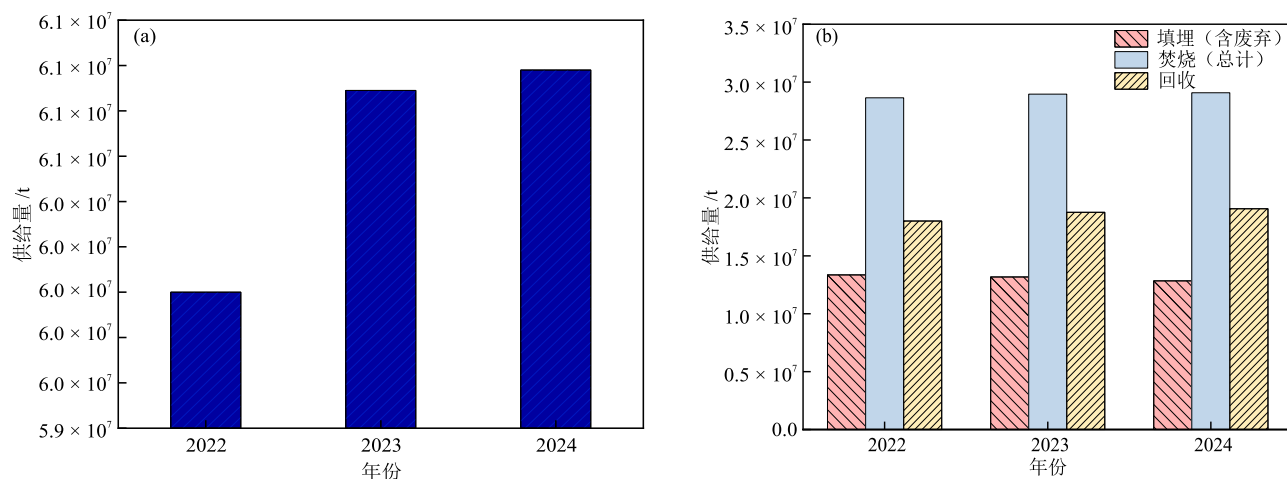


图1 2022—2024年中国废塑料行业供给量(a)和不同处理方式供给量(b)<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Waste plastic industry supply volumes (a) and supply volumes of different treatment methods (b) in China at 2022—2024<sup>[8]</sup>

废塑料处理方法示意图见图2<sup>[9]</sup>。废塑料处理途径主要有化学回收(回收聚合物或单体)、机械回收(再造塑料制品)、升级回收(转化为高价值材料)、能量回收(焚烧或转化为燃料、蜡)和填埋处置(无法再回收)等。其中,化学回收废塑料是通过热裂解或化学解聚等化学转化技术,将废塑料转化为高附加值的小分子烃或单体,并实现能量回收。热解作为化学回收方法,相比传统的填埋、焚烧和机械回收,具有更高的资源转化效率和环境友好性。热解可处理混合或污染塑料,产物多样且价值高,高热值油、合成气和炭等产物可作为替代燃料或化

工原料支持循环经济。从产业化前景看,热解已实现从实验室规模到工业规模的过渡,技术成熟度较高,已在多国进入中试或工业化阶段。尽管经济性和排放问题仍需优化,但热解在技术成熟度、产品高值化和产业化潜力方面均显著优于传统方法<sup>[10]</sup>。

热解处理废塑料的核心是通过无氧或低氧环境下高温加热过程,使废塑料的分子链发生随机断裂,进而分解为热解油、气体和炭黑等多种高附加值产物<sup>[11-12]</sup>。热解可以分为低温热解和高温热解,热解技术主要包括催化热解、共热解、光催化热解、等离子体热解、微波热解和焦耳加热等。



图2 废塑料处理方法示意图<sup>[9]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of processing methods of waste plastics<sup>[9]</sup>

本文重点围绕废塑料热解基本机理、热解技术类型、工艺类型和产业化现状等进行综述,分析当前在原料复杂性、催化剂和反应器类型等方面存在的技术瓶颈,并对高效预处理、催化剂开发和系统集成及优化等方面的未来发展趋势进行展望,以期为废塑料热解技术发展提供参考。本综述概览见图3。

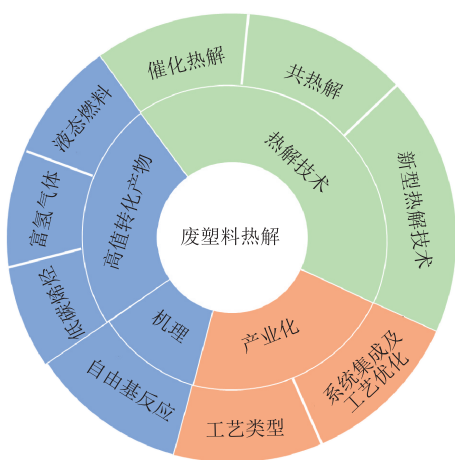


图3 综述概览

Fig. 3 Overview of review

## 1 废塑料热解机理与技术

### 1.1 热解机理

废塑料热解反应是由自由基引发的,整个热解反应过程主要分为链引发、二次裂解和终止3个阶段<sup>[13]</sup>。以LDPE为例展示了热解机理(图4)<sup>[13]</sup>。在链引发阶段,主要发生由自由基引发的主链共价键和支链共价键的断裂,产生末端C上带有自由电子

的自由基。主链断裂过程中会产生大量不稳定的长链自由基(LCR)。同时,由于废塑料结构的高度支化,连接在主链上的众多支链也会发生共价键断裂,生成短链自由基(SCR),SCR可通过夺氢反应进一步转化为小分子烯烃<sup>[14]</sup>。

进入二次裂解阶段后,主要发生随机断裂和链端断裂两种反应。随机断裂是指由主链断裂产生的LCR从饱和链端的长链分子(LCP)的任意碳原子上夺取氢原子,从而使LCR转化为LCP,而被夺氢的LCP则转变为带碳正离子的长链自由基(LCI)。LCI随后发生 $\beta$ -断裂,生成链端不饱和的较短分子(LCO)和更短链的LCR,后者可继续参与对其他LCP的夺氢反应,形成连续循环的链反应<sup>[15]</sup>。主链断裂生成的LCR因其 $\beta$ 位键能较低,容易发生链端断裂,生成乙烯(ETL)和更短链的LCR,这些LCR进一步连续裂解可形成丙烯(PPL)、ETL和丁二烯(BTL)等小分子烯烃。

在反应终止阶段,链引发与二次裂解中生成的LCR之间可发生重组反应,结合为稳定的LCP,从而实现反应终止。此外,反应也可通过LCR的歧化反应终止,即一个LCR从另一个LCR的第二个碳上夺取氢原子生成LCP,并使失去氢的链端转化为LCO,从而实现反应终止。

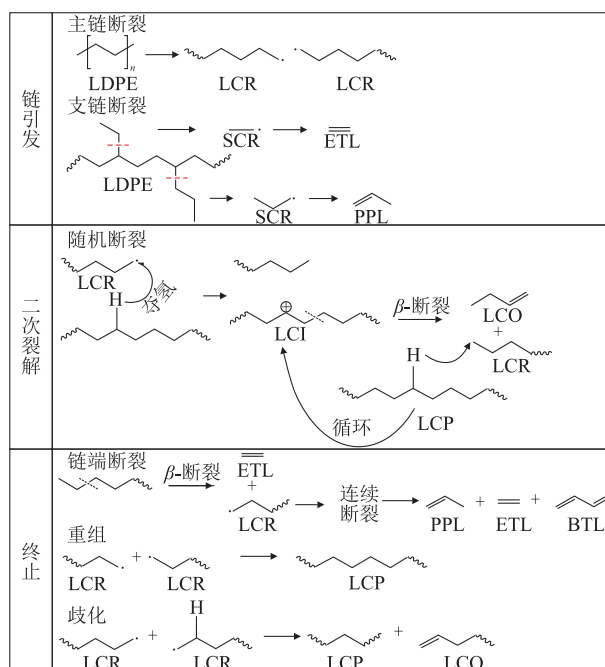


图4 LDPE热解机理示意图<sup>[13]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of pyrolysis mechanism of LDPE<sup>[13]</sup>

#### 1.1.1 聚烯烃热解

聚烯烃主要包括PE和PP。PE热解是由C—C

裂解引发的,裂解发生在PE链的任意位置并产生两个大自由基,这些自由基发生 $\beta$ -断裂生成一个乙烯单体和另一个初级自由基。此外,自由基反应可形成次级内部自由基,然后根据 $\beta$ -断裂的位置产生 $\alpha$ -烯烃或末端不饱和聚合物残基,以及在氢原子提取后转化为烷烃的自由基。PP热解是沿主链的随机裂解过程。每一次随机裂解都能产生一个初级自由基和一个次级自由基,两个基团以与PE热解过程相似的方式依次转化为烷烃、烯烃<sup>[16]</sup>。

### 1.1.2 聚酯热解

PET热解依赖于分子机制。起始反应涉及酯键断裂。该反应通过六元过渡态发展,形成两个分别含有烯烃末端基团和羧基的寡聚体。在300℃下,两种物质进一步分解会产生多种产物,如乙醛和二氧化碳<sup>[17]</sup>。在PET热解过程中,C—O键断裂主要是酯键的烷基侧C—O键发生断裂,这是由于与芳环相连的C—O键具有更高的键能而较难断裂;C—C键断裂则是主链中烷基C—C键发生断裂,这些C—C键在热解过程中与C—O键形成竞争反应机制;C—H键断裂通常不是主链降解的直接引发步骤,而是作为后续反应的一部分参与脱氢或芳构化过程。与仅含C—C键的聚烯烃(如PE、PP)相比,PET的热解机理存在显著差异,即聚烯烃主要通过随机断裂机制在酸性或金属位点上引发C—C键断裂,生成烷烃和烯烃;而PET因主链中含有C—O键和芳环结构,其降解需同时考虑C—O键的选择性断裂和由此产生的含氧中间体的影响,产物中富含酸、酯等含氧化合物,同时芳环结构得以保留,这使得PET的热解路径更复杂,通常需要在双功能催化剂协同作用下使C—O键和C—C键活化<sup>[18]</sup>。

## 1.2 主要影响因素

### 1.2.1 温度

在废塑料热解过程中,温度起着关键作用。当温度偏低时,废塑料往往难以彻底热解。通过调节温度可以有效控制气体和液体产物的生成比例,如提高温度通常更有利于气体产物形成<sup>[19]</sup>。聚烯烃热解在不同温度区间表现出显著差异,在低温区,热解产物以蜡为主;在中温区,产物逐渐向轻质烯烃和液态烃类转化;在高温区,乙烯产率达到峰值,但丙烯和丁烯产率因二次反应而显著降低,同时芳烃和甲烷产率提高<sup>[20]</sup>。对于聚酯塑料的热解,在低温段,PET主要通过离子机理发生主链异裂和酯交换反应,生成烯酯端和羧酸端结构,轻质烃类产率较低;在中温段,PET进入主要失重阶段,C—O键与C—C键发

生竞争断裂,生成苯甲酸、乙烯基苯甲酸酯、一氧化碳/二氧化碳等含氧化合物;在高温段,含氧产物发生脱氧和芳构化反应,苯甲酸通过脱羧转化为苯,并进一步生成甲苯、联苯和多环芳烃等芳烃产物<sup>[21]</sup>。

根据停留时间和升温速率,热解可分为慢速、快速和闪速3种类型<sup>[19]</sup>。慢速热解传统上侧重于生产炭。然而,可以调整条件使慢速热解产生更多的热解油和气体<sup>[22]</sup>。相比之下,快速和闪速热解更适合更大幅度地提高气体和热解油产量。快速热解可在无氧气的情况下快速加热碳基材料,使用中等到高的加热速率。与快速热解相比,闪速热解发生时间不到10s,加热速率非常高。在非等温条件下,提高升温速率会使热解油密度增大,残渣量减小;而在等温条件下,延长停留时间会降低热解油产率,同时提升气态烃产量。对于快速热解,停留时间为10s时,更有利于生成C1~C3等小分子产物<sup>[23]</sup>。对比了慢速、快速和闪速热解的典型产物,结果见表1。

表1 慢速、快速和闪速热解的典型产物对比<sup>[19-22]</sup>

Table 1 Comparison of typical products of slow, fast and flash pyrolysis<sup>[19-22]</sup>

热解类型	升温速率 / (°C·min <sup>-1</sup> )	停留时间	典型产物 <sup>①</sup>
慢速热解	1~10	> 30 min	炭为主,可调整条件提升热解油和气体产量
快速热解	50~100	几秒至 10~20 min	液体30%~60%,气体15%~35%, 炭10%~15%
闪速热解	1000	1 s	气体60%~80%,炭10%~15%

注:①百分数均为质量分数。

降温速率也会对废塑料热解过程产生影响。如CHEN等<sup>[24]</sup>发现在废塑料选择性升级为长链末端烯烃的过程中,急冷条件是获得高选择性产物的关键控制手段,其核心在于利用超快淬火速率,将激光驱动加热生成的中间态产物瞬间“冻结”,从而有效抑制传统缓慢冷却过程中极易发生的异构化、二次裂解或芳构化等副反应。为实现这一目标,可采用高热导率的介质(如冷金属基板或高速惰性气流)确保热量迅速导出,同时借助惰性气氛防止高温碎片发生氧化,并利用空间限域设计使加热区极小、冷区极大,确保产物一旦离开高温反应区便立即进入冷阱环境,从而精准地保留动力学控制的长链末端烯烃。

### 1.2.2 压力

压力是影响废塑料热解产物分布的关键因素之一,较高的压力会延长物料停留时间,促进聚合

物链的深度裂解,从而使液体产物向低碳数产物偏移,生成更多轻烃类产物。低压则会缩短停留时间,降低裂解程度,倾向于生成重烃产物(如蜡状物质)<sup>[25]</sup>。RADHAKRISHNAN等<sup>[26]</sup>将压力从0.1 MPa(室温)提升至0.8 MPa(410 °C),气态产率显著从6%提升至13%。ZAYOUD等<sup>[27]</sup>研究了压力对PS热解产物苯乙烯和BTEX(苯、甲苯、乙苯和二甲苯)产率的影响,发现在550 °C下,绝对压力由0.100 MPa降至接近真空的0.002 MPa时,苯乙烯产率由41.2%提高至55.9%,而BTEX产率由15.6%降至5.6%。

### 1.2.3 催化剂

催化剂是影响废塑料热解过程的重要因素。在热解过程中引入催化剂,通过改变废塑料热解过程调控产物分布,可实现热解产物的定向选择,同时降低反应能耗,提高气体产量<sup>[28]</sup>。Ni、Fe和Co等金属掺杂的催化剂均能有效抑制积炭,并促进重整和变换反应,从而显著提高氢气产量。催化剂的载体和制备方法会显著影响其催化活性和稳定性。Ni基催化剂在PE、PP和轮胎的热解中均表现出优异的催化性能。因此,合理选择和设计催化剂是优化热解过程、提高氢气产率的有效方法之一<sup>[29]</sup>。

废塑料热解技术虽在废塑料资源化方面展现出一定潜力,但其实际应用仍面临一系列挑战。在热解过程中,升温速率、压力和催化剂是影响产物分布的关键因素。优化这些参数是实现高效塑料热解转化的重要途径。此外,废塑料热解技术反应机理尚不明确,尤其是协同热解过程中自由基传递路径与产物选择性的关联仍需深入研究。

## 1.3 热解技术

热解技术可分为催化热解、共热解和新型热解技术等。热解技术的共性在于通过热能断裂废塑料高分子链的C—C键和C—H键,将废塑料转化为低分子量烃类产物,进而通过分馏或进一步反应获得热解油、气体等高附加值产品<sup>[30]</sup>。

### 1.3.1 催化热解

催化热解是一种将废塑料转化为高值产品的有效技术,其成本效益较高、运行温度较低且停留时间较短<sup>[10]</sup>。一方面,在热解过程中引入催化剂可以优化产物组成,使热解油产物在关键性质上趋近于汽油、柴油等常规燃料;另一方面,催化剂可以有效降低热解反应所需活化能,从而降低能量消耗。其中基于沸石的催化剂,尤其是ZSM-5的热解反应催化性能最为突出<sup>[31]</sup>。

AUXILIO等<sup>[32]</sup>研究了分子筛催化剂和高岭土

催化剂等对HDPE和城市废塑料催化热解的影响,发现相较于直接热解,催化热解可获得更高的气体产率。这主要是因为引入催化剂能够促使长链烃转化为短链烃。此外,作者还发现废塑料催化热解的气体产率与催化剂表面的酸性位点数量呈正相关。在直接热解过程中,石蜡与烯烃的产率之比显著小于催化热解的对应比值,说明直接热解以裂解反应为主导,而在催化热解条件下,烯烃的异构化和加氢等二次反应被显著促进。由于催化剂表面的Lewis酸性直接影响热解产物的烃类馏分选择性,高Lewis酸性催化剂更有利于生成汽油馏分(C5~C11),而低Lewis酸性催化剂则倾向于生成柴油馏分(C12~C25)。因此,通过调整Lewis酸性,可以实现对产物碳链长度的定向调控。QIU等<sup>[33]</sup>制备了一种无贵金属、可重复使用且耐杂质的双功能催化剂(MoS<sub>x</sub>-Hbeta),并将其用于废聚烯烃的加氢裂化。结果表明,高度分散的MoS<sub>x</sub>纳米颗粒负载于Hbeta沸石孔道内,可实现酸性裂解与加氢功能的协同作用。在温和条件(250 °C、2 MPa H<sub>2</sub>)下,MoS<sub>x</sub>-Hbeta可将高分子量聚烯烃高效转化为高值支链液态烷烃(C5~C12),产率高达97.1%。即使在180 °C低温下,MoS<sub>x</sub>-Hbeta的高分子量聚烯烃转化率也高达96%。该催化剂不仅适用于多种聚烯烃(LDPE、HDPE和PP等),还能耐受常见添加剂和含杂原子聚合物(如PET、PVC)的干扰,并可直接用于处理未经严格清洗的废塑料。此外,MoS<sub>x</sub>-Hbeta表现出良好的循环稳定性和再生性能,该研究为废塑料的低碳、低成本化学回收提供了有效解决方案。

在热解过程中引入催化剂,显著降低了反应温度、缩短了反应时间、提高了液体产物产率并改善了热解油品质。然而,催化热解仍面临从实验室迈向工业化应用的核心瓶颈,如催化剂成本较高、寿命较短、复杂原料预处理繁琐和系统集成困难等。

### 1.3.2 共热解

共热解是废塑料热解的重要研究方向之一,其核心在于协同处理废塑料与其他废弃物以提升热解效率与产物品质。废塑料与生物质(如木屑、秸秆)共热解时,可通过氢转移和协同效应显著改善生物油品质,提高其热值和稳定性,同时降低氧含量<sup>[34-35]</sup>。PE和PP通过提供富氢烯烃,可与生物质衍生的呋喃类化合物发生Diels-Alder反应,促进芳香烃生成并显著降低生物油氧含量;PS与生物质的协同作用较弱,但仍可通过氢转移降低生物油的氧含量;PET与生物质共热解可提高合成气和芳香含氧

化合物产率,但会产生酸性副产物;PVC可通过氯的固定化作用降低腐蚀并提高油品安全性。共热解可使生物油芳香烃含量显著提高,氧含量降低,同时气体产物中氢气和轻烯烃产量提高,焦炭产量和二氧化碳排放量降低,整体提升了产物品质与能源回收效率。未来研究应聚焦多组分共热解、催化剂优化和过程放大,以推动该技术的工业化应用<sup>[34]</sup>。

GIAMMATTEI等<sup>[36]</sup>提出了一种两步法处理农业塑料废弃物的策略,即首先对LDPE与秸秆进行共水热预处理,随后进行热解。结果表明,在250℃和300℃下进行水热预处理均可有效降低秸秆的氧含量和挥发性物质含量,而对LDPE影响较小。共水热预处理后样品在450℃或650℃下热解时,所得生物油中含氧化合物(如糠醛和酚类)含量显著降低,主要成分为脂肪烃,脂肪烃产率最高为98%,更接近纯LDPE热解油的组成,提升了其作为燃料的潜力。CHANG等<sup>[37]</sup>综述了木质纤维素生物质与塑料废弃物共热解制备液体燃料过程中的协同效应、反应机理和关键影响因素。作者认为生物质的富氧贫氢特性可与废塑料的富氢特性形成互补,共热解过程中废塑料作为氢供体可显著降低生物油的氧含量,提高其热值和稳定性,并通过自由基机制和Diels-Alder反应促进芳香烃生成。此外,废塑料与其他废弃物(如油泥、废轮胎)共热解不仅能实现多种废弃物的协同处理,减少环境污染,还能提升处理过程的经济性。

共热解技术通过将废塑料与生物质、煤或其他废弃物混合处理,利用原料间的协同效应,可降低整体热解温度和反应能耗,并在一定程度上抑制有害物质释放,进而提高资源综合利用效率。未来研究需着力于优化多组分共热解工艺,推动共热解技术从实验室研究到工业化应用的关键跨越。

### 1.3.3 新型热解技术

光催化热解技术利用了光催化剂对光的吸收和转化性能。在光照条件下,光催化剂能够吸收光能并转化为化学能,进而引发废塑料分子的降解反应。这种反应通常涉及自由基的生成和链式反应<sup>[38]</sup>。MIAO等<sup>[39]</sup>开发了一种用于处理聚烯烃的光热催化系统。该系统通过聚焦氙灯或太阳光加热Ru/TiO<sub>2</sub>催化剂并融化聚合物,实现了催化剂与聚烯烃的充分接触,为后续断裂C—C键和C—H键奠定了基础。与直接热解相比,光热催化热解通过局部加热显著降低了系统能耗。同时,紫外辐射有效降低了聚烯烃的化学惰性。作者发现在无催化剂时,LDPE

热分解通常优先断裂端链C—C键;而在无催化剂+紫外照射下则优先发生内部C—C键断裂。在300℃、1 MPa和 $V(\text{H}_2):V(\text{N}_2) = 70:30$ 条件下,甲烷选择性超过90%;在220℃、3 MPa和 $V(\text{H}_2):V(\text{N}_2) = 70:30$ 条件下,液态产物中符合汽油和柴油组成(C5~C21)的产物选择性为86%,而直接热解条件下仅为64%,这说明高氢分压有利于生成高选择性液体燃料。该系统对PP等聚烯烃表现出良好的降解性能,并且太阳驱动光驱动的降解效果与氙灯光源相当。作者采用Aspen Plus分析了系统的技术经济性。结果表明,反应器能耗在总能耗中占比为90%,验证了太阳能驱动废塑料催化热解转化为燃料的技术可行性和市场潜力。

等离子热解工艺的核心优势在于利用等离子体的高能活化特性,在温和条件下实现废塑料的高效转化。GAO等<sup>[40]</sup>开发了一种微波驱动的液态金属(以共晶镓铟合金(EGaIn)为代表)协同解聚技术,并将其用于聚烯烃的升级回收。在微波辐照下,液态金属涂层在聚烯烃颗粒表面形成了三维多孔导电网络,通过涡流加热和电弧放电等离子体效应,在相对低温(平均约300℃)、常压下即可高效断裂聚烯烃分子的C—H键和C—C键。该技术对聚烯烃表现出优异的解聚性能,以PE和PP为原料时,油品质量分数分别为85.9%和81.0%,且油品分布较窄(以C21为中心);气体产物中C2~C4烯烃选择性分别为50.0%和65.3%。液态金属的流动性使其在反应后能与产物自发分离,无需额外处理即可直接循环使用。在连续30次循环中,液态金属性能稳定,其聚烯烃转化率均高于99%。与传统热解相比,该技术显著降低了能耗(降低64.4%),并且无需使用贵金属或高压氢气,过程简单,成本低廉,展现出较大的工业应用潜力。AMINU等<sup>[41]</sup>开发了一种两段式热解-非热等离子体催化重整工艺,用于以废塑料为原料生产氢气。该技术在第一段通过热解将废塑料转化为挥发性烃类,随后在第二段引入介质阻挡放电(DBD)非热等离子体反应器,并耦合Ni/MCM-41催化剂进行低温(约250℃)蒸汽重整。与传统热催化重整(约800℃)相比,该技术利用非热等离子体的高能电子(1~10 eV)在低温下即可有效断裂烃类分子的C—C键和C—H键,同时等离子体与催化剂的协同作用可促进重整反应和水煤气变换反应,从而显著提高了氢气产率。作者分别以不同类型塑料(聚烯烃、PS和PET)和混合废塑料为原料进行了测试,发现聚烯烃(HDPE、LDPE和PP)的

氢气产率最高(16.3~18.0 mmol/g),而含芳香环的PS和PET产率较低,分别为11.9 mmol/g和10.2 mmol/g,且PET因具有含氧结构会产生大量一氧化碳/二氧化碳。混合废塑料的氢气产率为13.4~16.9 mmol/g,氢气产率受混合废塑料中聚烯烃含量的影响比较显著。该技术为废塑料的资源化利用提供了一条新途径。

微波辅助热解(MAP)技术已广泛应用于多种塑料转化,可将其高效转化为燃油、氢气等产物。FAN等<sup>[42]</sup>采用微波辅助热解技术将PS转化为航空油,系统研究了碳化硅负载量、微波功率和热解温度对产物产率及组成的影响。结果表明,在SiC负载量为60 g、微波功率为650 W和热解温度为460 °C的条件下,C8~C16烃类油品产率最高为98.78%。不同塑料的适宜热解温度、微波吸收剂和催化剂体系存在显著差异,如PS在较低温度下即可获得高油产率。目前,微波辅助热解技术面临的主要挑战在于:真实混合塑料废料的杂质处理、催化剂的稳定性与再生、温度精准监测、微波吸收剂的循环利用,以及从实验室向连续化、规模化生产的转化等<sup>[43]</sup>。

焦耳加热具有升温快、无需外加催化剂和可结合脉冲技术等优点,但存在间歇式操作难以连续进料、放大实验中热损失较大、积炭控制较难和特殊塑料转化效率低等挑战,需在反应器设计、工艺连续化与系统集成等方面进一步优化以实现工业应用。MA等<sup>[44]</sup>开发了一种基于焦耳加热的催化重整工艺,用于将废塑料与二氧化碳协同转化为合成气,部分研究结果见图5。在高温作用下,PE等首先分解为气态烃,随后气态烃与二氧化碳在电热丝表面发生重整反应,生成一氧化碳和氢气。作者发现该工艺对不同废塑料的处理具有适用性与转化可行性(图5(a))。将反应规模扩大至引入1 g PE和

3.3 g 二氧化碳的大型石英管反应器中,可在30 min内生成2.84 g一氧化碳和0.091 g氢气,说明该工艺具有从实验室向实际应用过渡的潜力(图5(b))。同时,来自二氧化碳的氧物种能有效清除反应中产生的积炭,从而维持反应系统的稳定性。DONG等<sup>[45]</sup>设计了一种用于废塑料解聚的电控时空加热反应器。通过对顶部加热层施加脉冲电流,可在反应层内产生一个垂直的空间温度梯度,同时毫秒级的瞬时脉冲加热能在局部产生高温以断裂化学键,而短暂的持续时间则可有效抑制副反应。该反应器可在无需催化剂的情况下将PP和PET等高选择性解聚为单体。分析了不同废塑料热解技术的优点和挑战,结果见表2。

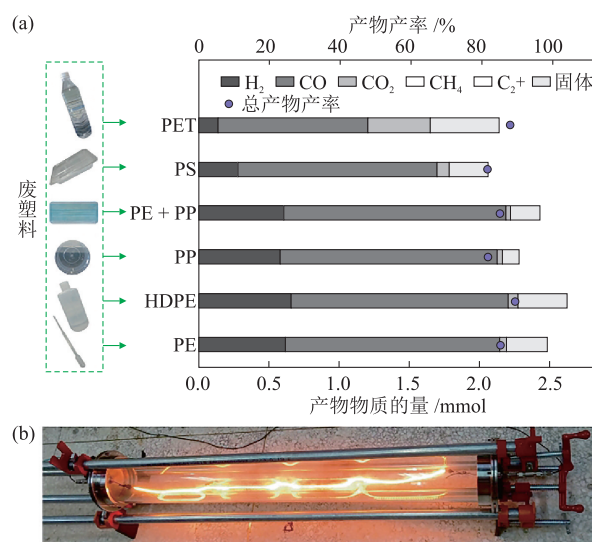


图5(a)中产物不包括水。

图5 基于焦耳加热的催化重整工艺对不同废塑料的处理效果(a)和放大实验照片(b)<sup>[44]</sup>

Fig. 5 Processing effects of different waste plastics (a) and scale-up experiment image (b) of catalytic reforming process based on Joule heating<sup>[44]</sup>

表2 不同废塑料热解技术的优点和挑战

Table 2 Advantages and challenges of different pyrolysis technologies for waste plastics

热解技术	优点	挑战	参考文献
催化热解	可降低反应温度与能耗,优化产物选择性,提高油品质量	催化剂成本与寿命、复杂原料预处理和工业化放大存在挑战	[10,31-33]
共热解	可提高热解效率与产物品质,实现多种废弃物协同处理,减少环境污染	多组分体系复杂,需优化工艺参数以实现最佳协同效应	[34-37]
光催化热解	可降低废塑料化学惰性和系统能耗,高氢分压条件下可调控产物选择性	反应需在特定光照条件下进行,对光源依赖性强	[38-39]
等离子热解	可在常压和相对低温下实现高效转化	工程放大需解决均匀加热问题;原料适应性有待进一步提升	[40-41]
微波辅助热解	加热效率高,应用于特定废塑料可获得高价值产物	混合塑料杂质处理、催化剂稳定性、温度精准监测、吸收剂循环利用和规模化均存在困难	[42-43]
焦耳加热	升温极快,无需外加催化剂,二氧化碳氧物种可清除积炭	间歇式操作难连续,放大实验中存在热损失与积炭控制问题,特殊塑料转化效率低	[44]

## 2 废塑料热解高值转化产物

通过催化剂选择和工艺条件调控,可实现目标产物的定向转化。其中,催化剂的酸性和孔结构是影响催化热解废塑料的关键因素。较高的酸性可使废塑料催化热解过程中裂解反应等活性位点数量增大,而孔结构会影响反应物与催化剂活性位点的接触和结合,同时会对催化热解产物的分子量有影响。根据产品要求,可通过金属改性、酸碱处理和催化剂合成方法优化等手段选择性地调控催化剂酸性和孔结构<sup>[46]</sup>。目前,废塑料热解高值转化产物主要有液态燃料、富氢气体和低碳烯烃。

### 2.1 液态燃料

废塑料催化转化生成的液态燃料并非单一产物,通过调整催化剂和工艺,可定向获得混合烃类燃料、高辛烷值汽油、长链烷基芳烃或轻质异构烷烃等高附加值产品。WU等<sup>[47]</sup>设计并构建了一种高效双催化剂(Rh-CeO<sub>2</sub>/CeHY),用于在低温(300 °C)下将废弃塑料高效转化为液态燃料。结果表明,Rh在CeO<sub>2</sub>上以单原子(Rh<sub>1</sub>)和团簇(Rh<sub>n</sub>)形式共存,二者协同作用下可显著提升LDPE转化率(>99%)和液体燃料选择性(78.3%)。该研究为废弃塑料低温高效转化提供了一种简洁高效的双功能催化策略。CEN等<sup>[48]</sup>利用一种层状自柱撑沸石(LSP-Z100),在不依赖贵金属催化剂或外部氢气的情况下,将PE高效升级为汽油。在240 °C的温和条件下,4 h内即可实现81%的汽油产率和高达99%的汽油选择性,并且所得汽油的研究法辛烷值高达88.0,优于商业汽油。该研究为废塑料的低成本、高附加值化学回收提供了一条极具工业潜力的新路径。ZHANG等<sup>[49]</sup>在无外加溶剂和氢气的条件下,使用 $\gamma$ -氧化铝负载铂基催化剂在280 °C下实现了PE高效催化转化,目标产物产率最高达80%。ZHANG等<sup>[50]</sup>提出了一种在低温(<100 °C)下将聚烯烃高效升级转化为液态烷烃(主要为C<sub>6</sub>-C<sub>10</sub>异构烷烃)的新策略。作者通过使用氯铝离子液体作为Lewis酸性催化剂,将聚合物C-C键的吸热裂解与裂解产物的放热烷基化反应耦合,显著降低了反应能垒,在70 °C下实现了未处理聚烯烃的完全转化。

综合分析上述用于液态燃料制备的催化体系,可归纳为3种策略:(1)贵金属单原子/团簇协同催化,利用金属-载体的强相互作用在低温下激活C—C键断裂,获得较高的原料转化率;(2)采用酸催化和孔道限域,通过调控沸石的酸性和层级孔道结构,在不

依赖贵金属和外加氢源的条件下实现高选择性裂解与异构化;(3)双功能或多步耦合催化,通过将传统的裂解反应与其他放热反应耦合,降低反应能垒。由此可见,用于液态燃料制备的催化剂正从依靠单一活性位点向多功能协同方向发展。

### 2.2 富氢气体

废塑料制取富氢气体旨在将废塑料中的碳氢资源最大化地转化为氢气或氢碳比( $n(\text{H}_2)/n(\text{CO})$ )可调的合成气。JIE等<sup>[51]</sup>开发了一种简单、快速的微波催化一步法,用于将废塑料(如HDPE、PP)高效解构为氢气和高价值碳材料。该方法以廉价易得的铁基催化剂作为微波敏化剂,选择性地生成氢气(氢气产率高达55.6 mmol/g,氢气效率超过97%)和以多壁碳纳米管为主的固体碳材料。WANG等<sup>[52]</sup>采用两段式热解-催化蒸汽重整制氢技术,以活性炭负载的铁基催化剂(Fe/AC)催化PP热解。结果表明,在铁质量分数为15%、 $m(\text{PP}):m(\text{Fe/AC})=1.00:0.75$ 和水蒸气添加量为6 mL/h的条件下,产氢效果最佳,氢气产率可达112.71 mmol/g,较无水条件(38.73 mmol/g)下显著提升。该研究为废塑料高值化转化为富氢合成气提供了一种高效可行的技术路径。YAO等<sup>[53]</sup>将Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>催化剂用于800 °C下废塑料热解-催化水蒸气重整实验。结果表明,在HDPE、PP和PS中,Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>催化剂作用下PS的重整效果最好,其氢气产率为62.26 mmol/g。

在制氢领域,催化剂的设计体现了能量输入方式与催化活性的协同。传统铁基、镍基重整催化剂依赖高温下水蒸气与裂解产物的二次反应,其核心在于提高镍的抗烧结和抗积炭性能。微波响应型铁基催化剂则展现了不同的作用机制,该类型催化剂不仅能够作为催化活性中心,更重要的是能作为高效的微波吸收剂(敏化剂),借助微波能到热能的快速转换,在废塑料内部实现局部高温,从而驱动C—C键和C—H键的选择性断裂。针对制氢路径,除了优化催化剂本身的化学组成,耦合新型外场(如微波)也是强化反应过程和调控产物分布的重要手段。

### 2.3 低碳烯烃

废塑料经过热解处理可转化为由气态烃类产物和液体馏分油组成的混合物。其中,气态烃类产物中的C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>低碳烯烃具有重要的化工应用价值,可作为生产合成树脂、纤维、橡胶和其他基础有机化合物的关键原料。SELVAM等<sup>[54]</sup>报道了一种利用快速脉冲超声加热结合H-ZSM-5催化剂,在毫秒级

时间内将聚烯烃高效解构为C2~C4轻质烯烃的逐步电催化方法。该方法通过超快升温 and 短接触时间,在较高的 $m(\text{聚烯烃})/m(\text{催化剂})$ 下实现了聚烯烃完全转化,目标产物选择性较高(> 90%),显著优于传统热解或连续加热处理方式,为聚烯烃的循环管理提供了一种低碳、低能耗路径。ZHAO等<sup>[55]</sup>制备了一种Zn/b-ZnO混合催化剂,结合微波辅助催化系统,在常压、无氢气条件下实现了废塑料(PE、PP和填埋场混合塑料)的高效裂解。在该催化剂作用下于280 °C反应30 min,废塑料可几乎完全转化为润滑油基础油前驱体和C2~C4烯烃单体,油产率高达70%~84%,具有较高的能量效率和工业应用潜力。CONK等<sup>[56]</sup>报道了一种由二氧化硅负载氧化钨和 $\gamma$ -氧化铝负载钠组成的非贵金属多相催化体系。在320 °C和乙烯存在条件下,无需对聚烯烃进行预脱氢即可实现PE、PP或PE + PP混合物的高效解聚。该研究为混合聚烯烃定向转化为高价值轻质烯烃提供了一条具有工业化潜力的途

径。LIU等<sup>[57]</sup>采用沸石-金属氧化物复合催化体系(HZSM-5 + CuZnZrO<sub>4</sub>),在无外加氢气和溶剂的条件下,实现了PE与CO<sub>2</sub>的耦合转化。在380 °C下,芳烃产率高达62.5%,其中苯、甲苯和二甲苯在芳烃中占比为60%,同时实现了CO<sub>2</sub>的有效转化(0.55 mmol/g)。该研究为废塑料与CO<sub>2</sub>的协同资源化利用提供了新思路。

针对C2~C4低碳烯烃的制备,催化体系呈现出多维度创新特征。首先,基于ZSM-5分子筛的酸中心催化依然是核心,通过耦合极端非平衡加热技术,可显著抑制烯烃的二次氢转移反应。其次,双金属氧化物/沸石复合体系表现出多功能催化潜力,即既能活化塑料大分子,又能引入第二反应物,实现耦合转化,提高碳原子经济性。最后,非贵金属串联催化体系可通过烯烃介导的化学裂解获得较高选择性的单一烯烃(如丙烯)。对比了用于以废塑料制备高值产物的典型催化剂的催化性能,结果见表3。

表3 用于以废塑料为原料制备高值产物的典型催化剂的催化性能

Table 3 Catalytic performances of typical catalysts for preparing high-value products from waste plastics

催化剂	反应温度 /°C	主要产物	原料转化率/目标产物产率	目标产物选择性 /%	参考文献
Rh-CeO <sub>2</sub> /CeHY	300	液态燃料	99% <sup>③</sup>	78.3	[47]
LSP-Z100	240	汽油	81% <sup>④</sup>	99	[48]
$\gamma$ -氧化铝负载铂基催化剂	280	长链烷基芳烃和烷基环烷烃	80% <sup>④</sup>	57	[49]
Lewis酸性氯铝离子液体催化剂	< 100	C6-C10异构烷烃	100% <sup>③</sup>	63	[50]
铁基催化剂	300	氢气和多壁碳纳米管	55.6 mmol/g <sup>④</sup>	97	[51]
Fe/AC	500	富氢气体	112.71 mmol/g <sup>④</sup>	65.5	[52]
Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 催化剂	800	富氢气体	62.26 mmol/g <sup>④</sup>	2.2~2.6 <sup>⑤</sup>	[53]
H-ZSM-5 <sup>①</sup>	730	C2~C4轻质烯烃	> 90% <sup>④</sup>	90	[54]
Zn/b-ZnO <sup>②</sup>	280	润滑油基础油前驱体和C2~C4烯烃	70%~84% <sup>④</sup>	73	[55]
二氧化硅负载氧化钨+ $\gamma$ -氧化铝负载钠	320	丙烯	> 87% <sup>④</sup>	> 95	[56]
HZSM-5 + CuZnZrO <sub>4</sub>	380	芳烃	62.5% <sup>④</sup>	60	[57]

注:①结合快速脉冲焦耳加热;②微波催化;③原料转化率;④目标产物产率;⑤ $n(\text{H}_2)/n(\text{CO})$ 。

### 3 废塑料热解工艺与产业化发展

工艺类型的选择直接关系到热解过程的效率、产物组成和技术的经济可行性。大规模废塑料热解过程的高效稳定运行是一项极其复杂的工程,需综合考虑反应器设计、加热方式和管线输送等多种因素。在设计整体工艺流程时需考虑的两个关键标准是保持较高的传热速率和较短的停留时间。系统梳理了固定床、流化床、螺杆传送工艺和回转窑工艺等热解工艺,并分析了温度、压力等关键操

作参数对热解过程的影响。

#### 3.1 废塑料热解工艺

##### 3.1.1 固定床工艺

在固定床反应器中,催化剂通常以静态床层形式填充。该反应器设计较为简单,但也存在一定的局限性,如废塑料的粒径和形状若不够均匀,容易导致进料不畅。此外,反应物料与催化剂的接触面积相对有限,反应效率可能受限<sup>[58]</sup>。ZHANG等<sup>[59]</sup>开发了一种两级催化热解工艺用于提升LDPE制轻质烯烃的产率。该工艺在固定床反应器中分两阶段

进行,其中第一阶段采用介孔MCM-41催化剂(温度为450 °C),将LDPE初步裂解为液态油及少量轻质烯烃;第二阶段采用Mg改性ZSM-5催化剂(温度为500 °C),进一步催化裂解高温挥发分,以提高轻质烯烃选择性。在最优条件下,轻质烯烃总产率达到45.80%。在某些多级热解工艺中,固定床常作为二级反应器,用于进一步转化初级热解产生的气态和液态产物。总体来看,固定床更适合实验室规模研究,或作为复杂工艺中的一环<sup>[59]</sup>。

### 3.1.2 流化床工艺

与固定床反应器相比,流化床反应器可大幅提升催化剂与物料的混合程度和接触效率。流化床反应器具有温度分布均匀、传热传质性能好和停留时间短等特点,有助于获得组成更一致的产物<sup>[58]</sup>。KIM等<sup>[60]</sup>采用一种新型流化床反应器对废聚乙烯(WPE)和废聚丙烯(WPP)进行了热解实验。结果表明,在WPE为原料、温度为528 °C和WPP为原料、温度为517 °C的条件下,蜡油产率分别为87.7%和82.3%,并且产物的主要成分是链烯烃和二烯烃,适合作为FCC单元的进料。KAMINSKY等<sup>[61]</sup>阐述了流化床热解技术在塑料化学回收领域从实验室研究迈向工业化应用的关键进展。流化床工艺的核心优势在于其卓越的传热性能,可实现快速裂解并抑制副反应,特别适用于处理混合、污染或填充的复杂塑料废弃物。KIM等<sup>[62]</sup>开发了一种新型裂解工艺,其示意图见图6。该工艺中集成了流化床反应器(FBR)和FCC单元,实现了由LDPE热解直接生产富含烯烃的蜡油。在520 °C下,蜡油产率最高可达95%;在596 °C下,蜡油中*n*-烯烃和*n*-二烯烃的总质量分数为82%,这些组分在后续FCC单元中可高效转化为乙烯和丙烯。流化床反应器特别适用于催化热解过程,催化剂可循环利用,无需频繁更换,且能够连续进料,在规模化生产中具备较好的经济性与适用性<sup>[62]</sup>。

### 3.1.3 螺杆输送工艺

螺杆反应器因其结构简单且可连续操作而成为实现快速热解的理想装置。该反应器的核心结构包括进料段、反应段、炭收集段和冷凝段。物料通过料斗进入后,由贯穿反应器的螺杆以恒定转速推动向前,在无氧氛围和精准控温下完成热解反应,产生的热解蒸汽经冷凝后收集为热解油,不可凝气体通过排气阀排出。HASAN等<sup>[63]</sup>利用螺杆反应器分别对美丽果壳、澳洲坚果壳、城市绿化废物和HDPE开展了系统性实验,重点考察了温度对产

物分布的影响。结果表明,螺杆反应器可精确控制停留时间和加热速率,525 °C下HDPE的热解油产率最高可达61.29%。螺杆反应器在废塑料热解中具有3个方面的优势:(1)能连续进料与稳定输运,适用于不同物理特性的固体废物;(2)停留时间可控,便于针对不同原料优化热解条件;(3)结构紧凑且易于放大,为实现从实验室向工业化过渡提供了可行性。

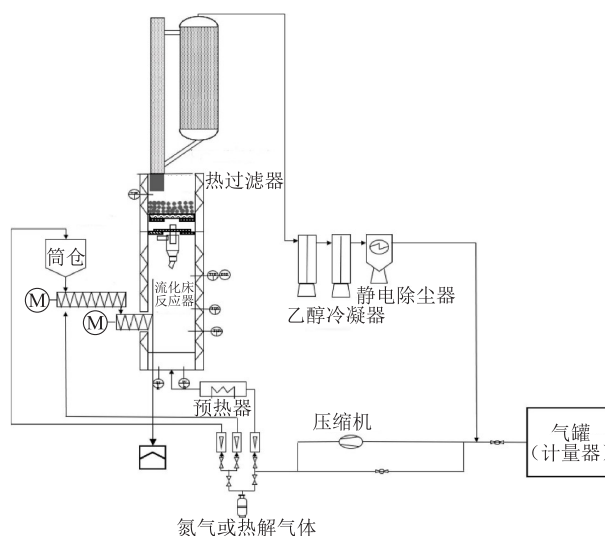


图6 新型裂解工艺示意图<sup>[62]</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of novel cleavage process<sup>[62]</sup>

### 3.1.4 回转窑工艺

回转窑坚固且经济实惠,被广泛用于处理复杂废弃物,热量通常通过外部加热的窑壁供给<sup>[64]</sup>。ZHANG等<sup>[65]</sup>利用载热体(石英砂)加热式回转窑对PE、PP、PS和模拟混合塑料(SMP)开展了热解实验,系统考察了载热体填充率(0%~20%)对产物分布的影响。该反应器的核心在于通过窑体的旋转带动载热体与塑料废物充分混合,利用载热体储存的热量实现快速热解。作者发现载热体填充率对传热效率和产物分布均具有决定性影响。当填充率为15%时,床层颗粒运动最为活跃,传热效率最佳,液相产物产率最高;填充率过低(5%)会导致床层整体滑落、混合不良,而填充率过高(20%)则会因剧烈传热引发产物二次裂解,使油品产率下降。回转窑反应器在废塑料热解中表现出的优势在于:(1)载热体与废物直接接触传热可有效克服废塑料导热性差、易粘连的难题;(2)旋转调控混合强度便于优化传热效率和停留时间;(3)填充率的灵活调节为定向调控产物分布提供了工艺窗口。

### 3.2 热解系统集成与产业化案例

热解技术作为废塑料化学回收的重要路径之一,已在部分国家实现了初步工业化应用,但装置规模普遍较小( $1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4$  t/a),产品以热解油、蜡为主<sup>[66]</sup>。废塑料热解工艺的工业可行性、系统集成优化和经济性,是从实验室规模到工业应用的关键优化内容。

APICELLA 等<sup>[67]</sup>研究了一种新型工业规模的原型反应器对废塑料(主要是PE和PP)的热解性能,重点考察了温度(390~430 °C)和沸石催化剂(天然菱沸石)对产物性质的影响,原型单元照片见图7。作者发现在较低温度(390 °C)下热解所得液体产物品质较高,产物主要是C10~C25烷烃和烯烃,符合柴油馏分但产率较低(约30%);在较高温度(430 °C)下液体产率显著提升至70%左右,但产物中含较多长链烃,产物品质下降。工业评估结果表明,390 °C下产物可作为柴油添加剂,掺混比(质量分数)高达20%;430 °C下产物经处理后可用作重质燃料油组分或在低掺混比(5%)下与柴油混用。该研究为废塑料热解产物的定向调控和工业应用提供了参考。



图7 原型单元照片<sup>[67]</sup>

Fig. 7 Prototype unit image<sup>[67]</sup>

HASAN 等<sup>[68]</sup>结合实验研究与 Aspen Plus 过程模拟,系统评估了废塑料热解制液体燃料的工艺可行性和经济性。作者首先在螺杆反应器中对废 HDPE 进行了热解实验,在 525 °C、停留时间 3 min 和原料粒径 2 mm 的条件下,热解油选择性为 61.29%,炭选择性为 10.98%,合成气选择性为 27.73%。Aspen Plus 模型验证结果显示误差小于 10%。此外,作者分别模拟了不同工况下 LDPE、PET、PP 和 PS 的热解行为并进行了技术经济分析。结果表明,一个废

HDPE 处理量为  $1 \times 10^4$  t/a 的热解工厂,其产品最低售价为 302.50 USD/t,净现值约  $1259 \times 10^4$  USD,投资回收期仅为 1.03 年,盈利潜力较高。该研究为废塑料热解工艺的优化与工业化应用提供了重要的模拟工具和经济决策依据。

英国 Recycling Technologies 公司针对废塑料开发了流化床热解系统,并依托该系统在英国 Swindon 建设 PS 热裂解回收苯乙烯的示范项目。热解系统的 4 个模块可在收集苯乙烯产物的同时,将热解产生的轻质烃类气体燃烧后为热解反应器供热<sup>[69]</sup>。我国的废塑料油化处理技术起步相对较晚,20 世纪 90 年代曾陆续建成了一些作坊形式的废塑料炼油厂,对废塑料热解进行了积极探索,因缺乏先进的废塑料高值化回收技术,存在严重的环境污染和安全隐患,且产物油远达不到质量标准,最终未能实现工业级应用而纷纷停产<sup>[19]</sup>。北京航天石化技术装备工程有限公司开发的固体热载体加热废塑料绝氧热解技术(SHCP®技术),采用固体热载体循环机械流化方式将废塑料在绝氧环境中加热分解,使废塑料转化为热解油,产物经进一步加工可转化为塑料单体、BTX、乙烯和丙烯等高附加值产物,并能实现连续化、大型化生产。目前,采用该技术正在内蒙古开展工业示范项目建设,并与沙特基础工业公司(SABIC)签署了技术许可协议<sup>[70]</sup>。青岛惠城环保科技集团股份有限公司自主研发的混合废塑料深度催化裂解(CPDCC)技术,采用全球首创的“一步法”工艺,直接将混合废塑料转化为低碳烯烃和混合芳烃等高附加值化工原料。该技术无需对难以分拣的混合废塑料进行复杂预处理,通过自主研发的气膜喷嘴技术解决了废塑料连续稳定进料难题,采用循环流化床局部逆流床反应器匹配梯度分子量烃类的活化能需求,并通过高温捕集氯化氢有效解决了含氯废塑料对装置的腐蚀问题。目前,基于该技术在广东揭阳建设的  $20 \times 10^4$  t/a 混合废塑料资源化综合利用工业试验装置已于 2025 年 7 月试生产成功,并顺利完成了试生产运行和首批塑料裂解轻油产品交付<sup>[71]</sup>。中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院正在积极推动废塑料热解技术的工业化示范,其代表性项目为中国石化塔河炼化公司拟建的废塑料化学循环装置。该装置以废弃农膜(地膜)为主要原料,采用中国石油化工股份有限公司自有技术,规划年处理废塑料规模为  $3.5 \times 10^4$  t,目前处于示范前期阶段。该项目是我国少数由国有大型石化企业主导的废塑料热解油化尝试,旨在

实现低值废塑料的高值化转化,并为产业链配套政策和标准体系建设提供实践依据<sup>[72]</sup>。中鹏未来公司在佛山建设的“生活垃圾制绿氢和高纯度二氧化碳工程示范项目”入选了国家发展和改革委员会《绿色低碳先进技术示范项目清单(第二批)》。该项目采用具有自主知识产权的“生活垃圾提质干气化制氢”工艺,可日处理500 t原生生活垃圾。项目核心在于通过“固废处理+绿能生产+碳循环”模式,将垃圾转化为氢气和液态二氧化碳,并同步回收金属、玻璃等无机物和硫磺等副产品。该工艺具有无需前端垃圾分类、能量转换效率较高(80%)、制氢成本较低(10 CNY/kg)和可实现负碳效应(1 t垃圾可减碳0.5 t)等优点。该项目可推动解决佛山南海区氢源瓶颈,促进垃圾处理从“无害化”向“资源化+能源化”升级,并为环保与新能源产业融合提供示范<sup>[73]</sup>。

总体来看,废塑料热解工艺中,流化床与固定床技术已较为成熟,但产业化推广仍面临工程放大和成本控制方面的挑战。目前,国内外虽有部分企业实现了废塑料热解的规模化应用,但仍远远无法满足废塑料的处理需求。在原料处理方面,现有工业化装置主要处理单一品类塑料,而实际回收的混合塑料分选难度大、批次间稳定性难以控制,原料中的杂质含量波动会显著影响热解产物品质。在经济性方面,废塑料回收分选成本高,热解装置的能耗较高,多重因素导致该技术短期内难以获得理想的经济回报。在未来,通过多能耦合、反应器优化和高效催化剂开发等手段提升工艺稳定性和技术经济性,有望进一步推动该技术的规模化与产业化应用。

## 4 结语与展望

热解技术作为废塑料化学回收与高值化利用的关键路径,已在催化剂开发、反应器设计和工艺优化等方面取得了显著进展。本文从技术与产业化视角系统综述了热解技术、高值转化用催化剂和反应器等方面的研究进展。然而,尽管废塑料热解技术正逐步走向产业化示范,但仍面临原料复杂性高、催化剂成本高、产物一致性差和产业化规模小等核心挑战。

为更加高效经济地实现废塑料热解资源化利用,未来研究应聚焦以下4个方向:(1)提升催化剂催化性能和延长催化剂寿命,开发高效、稳定、低成本的多功能催化剂,并通过双催化剂系统、载体改性和金属掺杂等方式调控酸性 with 孔结构,实现目标

产物的高选择性转化;(2)共热解协同机制与工艺开发,加强对废塑料与生物质共热解过程中氢转移、自由基相互作用等协同机理的研究,开发适用于多组分的共热解工艺,提升产物品质与过程稳定性;(3)优化反应器设计,针对不同原料与产物需求,优化反应器结构,提升传热传质效率,实现快速、连续且节能的热解过程;(4)系统集成优化,采用 Aspen Plus 等流程模拟工具进行工艺优化与系统能耗分析,重点对热解反应器、热解产物分离单元进行热力学分析和能流匹配,通过优化反应温度,降低热解系统综合能耗,提升全流程经济性,为热解技术规模化工业应用提供支撑。

为突破废塑料热解技术工业化放大瓶颈,提出以下两点建议:(1)开展中试与工程示范,验证系统集成方案,在典型产业场景下开展千吨级及以上规模的中试验证,重点考察复杂原料适应性、长周期运行稳定性、产物一致性及系统经济性,为工业化设计提供可靠数据支撑;(2)建立废塑料资源化利用行业碳足迹标准核算体系,评估废塑料热解技术减碳途径的可行性。

## 参考文献

- [1] CAO B, SUN Y K, GUO J J, et al. Synergistic effects of copyrolysis of macroalgae and polyvinyl chloride on bio-oil/bio-char properties and transferring regularity of chlorine [J]. *Fuel*, 2019, 246: 319-329.
- [2] 袁小鲁, 田宏宇, 李海岩, 等. 废弃塑料化学回收技术进展 [J]. *化工进展*, 2025, 44(12): 7205-7213.  
YUAN X L, TIAN H Y, LI H Y, et al. Advances in chemical recycling technologies for waste plastics [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2025, 44(12): 7205-7213.
- [3] 国金证券基础化工组. PVC: 国内扩产周期进入尾声, 供需格局有望迎来改善[R]. 成都: 国金证券股份有限公司, 2026.  
Guojin Securities Basic Chemicals Research Team. PVC: Domestic capacity expansion cycle nearing its end, supply-demand dynamics expected to improve [R]. Chengdu: Guojin Securities Co., Ltd., 2026.
- [4] 智研咨询. 2025年中国聚苯乙烯行业产业链图谱、产能、进出口及未来趋势研判: 行业新一轮扩能周期启动, 对外依存度下降[EB/OL]. (2025-06-25)[2025-12-29]. <https://www.chyxx.com/industry/1227145.html>.  
Chyxx. 2025 China polystyrene industry: Industrial chain map, production capacity, imports and exports, and future trends analysis: A new round of capacity expansion begins, reducing reliance on foreign imports[EB/OL]. (2025-06-25)[2025-12-29]. <https://www.chyxx.com/industry/1227145.html>.

- [5] LANDRIGAN P P J, DUNLOP S P, TRESKOVA M, et al. The lancet countdown on health and plastics [J]. *The Lancet*, 2025, 406(10507): 1044-1062.
- [6] Plastics Europe. Plastics—The fast facts 2024 [R]. Brussels: Plastics Europe, 2024.
- [7] United Nations Environment Programme. Global waste management outlook 2024: Beyond an age of waste-turning rubbish into a resource [R]. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2024.
- [8] 中研普华产业研究院. 2025—2030年中国废塑料行业深度调研及发展前景预测报告[R]. 深圳: 中研普华管理咨询有限公司, 2025.  
China Research & Puhua Industry Consulting Institute. In-depth research and development outlook forecast report on China waste plastic industry, 2025—2030 [R]. Shenzhen: China Research & Puhua Management Consulting Co., Ltd., 2025.
- [9] JEHANNO C, AITY J W, ROOSEN M, et al. Critical advances and future opportunities in upcycling commodity polymers [J]. *Nature*, 2022, 603(7903): 803-814.
- [10] LAMBA B Y. A review on current technologies for plastic waste treatment with focus on pyrolysis for energy recovery [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2025, 192: 107301.
- [11] WEI X Y, ZHANG Q, SHEN C F, et al. Tandem oxidative and thermal cracking of polypropylene at low temperatures [J]. *Materials Horizons*, 2023, 10(9): 3694-3701.
- [12] 赵洁, 宋春玲, 叶红, 等. 废塑料回收与资源化现状进展 [J]. *广州化工*, 2024, 52(21): 168-171.  
ZHAO J, SONG C L, YE H, et al. Research progress on recycling and resource utilization of waste plastics [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2024, 52(21): 168-171.
- [13] 张丁超, 安兴璇, 杜昭, 等. 废塑料微波热解研究进展 [J]. *化工环保*, 2025, 45(6): 749-760.  
ZHANG D C, AN X X, DU Z, et al. Research progress on microwave pyrolysis of waste plastics [J]. *Chemical Engineering and Environmental Protection*, 2025, 45(6): 749-760.
- [14] WONG S L, NGADI N, ABDULLAH T A T, et al. Conversion of low density polyethylene (LDPE) over ZSM-5 zeolite to liquid fuel [J]. *Fuel*, 2017, 192: 71-82.
- [15] PENG Y J, WANG X F, FAN L L, et al. Conversion of low-density polyethylene into monocyclic aromatic hydrocarbons through continuous microwave pyrolysis with ex-situ dual-catalyst beds [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 418: 138039.
- [16] DENG J Q, YI B J, MASEK O, et al. Co-pyrolysis of biomass and plastic waste into carbon materials with environmental applications: A critical review [J]. *Green Chemistry*, 2025, 27(22): 6320-6341.
- [17] RAHIMI A, GARCIA J M. Chemical recycling of waste plastics for new materials production [J]. *Nature Reviews Chemistry*, 2017, 1(6): 46.
- [18] RAN H C, ZHANG S, NI W Y, et al. Precise activation of C—C bonds for recycling and upcycling of plastics [J]. *Chemical Science*, 2024, 15(3): 795-831.
- [19] 姚璐, 朱建华, 武本成, 等. 废塑料的热解及工业应用现状 [J]. *工程塑料应用*, 2025, 53(3): 174-180.  
YAO L, ZHU J H, WU B C, et al. Pyrolysis and industrial application of waste plastics [J]. *Engineering Plastics Applications*, 2025, 53(3): 174-180.
- [20] ABBAS-ABADI M S, UREEL Y, ESCHENBACHER A, et al. Challenges and opportunities of light olefin production via thermal and catalytic pyrolysis of end-of-life polyolefins: Towards full recyclability [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2023, 96: 101046.
- [21] HUUJURI U, GHOSHAL A K, GUMMA S. Temperature-dependent pyrolytic product evolution profile for low-density polyethylene from gas chromatographic study [J]. *Waste Management*, 2010, 30(5): 814-820.
- [22] UDDIN M B, RASUL M G, CHOWDHURY A A, et al. Hydrogen production from plastic waste pyrolysis syngas: A review on progresses and challenges [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 158: 150512.
- [23] SINGH R K, RUJ B, SADHUKHAN A K, et al. Impact of fast and slow pyrolysis on the degradation of mixed plastic waste: Product yield analysis and their characterization [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2019, 92(6): 1647-1657.
- [24] CHEN L, CHANG F L, HE G J, et al. Laser-driven superfast-heating and quenching approach to selectively upcycle waste polyolefin into long-chain terminal alkenes and functionalization [J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36(13): e14837.
- [25] KUSENBERG M, ESCHENBACHER A, DJOKIC M R, et al. Opportunities and challenges for the application of post-consumer plastic waste pyrolysis oils as steam cracker feedstocks: To decontaminate or not to decontaminate? [J]. *Waste Management*, 2022, 138: 83-115.
- [26] RADHAKRISHNAN K, KUMAR P S, RANGASAMY G, et al. A critical review on pyrolysis method as sustainable conversion of waste plastics into fuels [J]. *Fuel*, 2023, 337: 126890.
- [27] ZAYOUD A, THI H D, KUSENBERG M, et al. Pyrolysis of end-of-life polystyrene in a pilot-scale reactor: Maximizing styrene production [J]. *Waste Management*, 2022, 139: 85-95.
- [28] NAHVI M, KOOHI A D, SEDIGHI M. Thermodynamic analysis and technoeconomic assessment of fluid catalytic cracking unit in the oil refining process [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 413: 137447.
- [29] WANG S, SUN Y, SHAN R, et al. Polypropylene pyrolysis and steam reforming over Fe-based catalyst supported on

- activated carbon for the production of hydrogen-rich syngas [J]. *Carbon Resources Conversion*, 2023, 6(3): 173-182.
- [30] HU B, WANG S, YAN J B, et al. Review of waste plastics treatment and utilization: Efficient conversion and high value utilization [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 183: 378-398.
- [31] CHANDRAN M, TAMILKOLUNDU S, MURUGESAN C. Conversion of plastic waste to fuel [J]. *Plastic Waste and Recycling*, 2020, 33: 385-399.
- [32] AUXILIO A R, CHOO W L, KOHLI I, et al. An experimental study on thermo-catalytic pyrolysis of plastic waste using a continuous pyrolyser [J]. *Waste Management*, 2017, 67: 143-154.
- [33] QIU Z T, LIN S Y, CHEN Z, et al. A reusable, impurity-tolerant and noble metal-free catalyst for hydrocracking of waste polyolefins [J]. *Science Advances*, 2023, 9(25): e5332.
- [34] BHUSHAN D, HOODA S, MONDAL P. Co-pyrolysis of biomass and plastic wastes and application of machine learning for modelling of the process: A comprehensive review [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2025, 119: 101973.
- [35] NAWAZ A, RAZZAK S A. Co-pyrolysis of biomass and different plastic waste to reduce hazardous waste and subsequent production of energy products: A review on advancement, synergies, and future prospects [J]. *Renewable Energy*, 2024, 224: 120103.
- [36] GIAMMATTEI P, KAROD M, DARZI R, et al. Pyrolysis of Co-hydrothermally pretreated LDPE and straw for enhanced bio-oil recovery from agricultural plastic waste [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2025, 191: 107184.
- [37] CHANG W Y, WANG X T, XIE X Y, et al. Recent progress on the synergistic preparation of liquid fuels by co-pyrolysis of lignocellulosic biomass and plastic wastes [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2025, 119: 102019.
- [38] 欧阳萍, 李晋楼. 废塑料热解制燃料技术研究进展[J/OL]. *化工进展*, 1-14[2025-12-29]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2025-1237>.
- OU Y P, LI J L. Advances in pyrolysis of plastic wastes to fuel[J/OL]. *Chemical Engineering Advances*, 1-14[2025-12-29]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2025-1237>.
- [39] MIAO Y X, ZHAO Y X, WATERHOUSE G I N, et al. Photothermal recycling of waste polyolefin plastics into liquid fuels with high selectivity under solvent-free conditions [J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 4242.
- [40] GAO J Y, ZHAO J, XING Z R, et al. Microwave-powered liquid metal degradation of polyolefins [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(6): 2412539.
- [41] AMINU I, NAHIL M A, WILLIAMS P T. Pyrolysis-plasma/catalytic reforming of post-consumer waste plastics for hydrogen production [J]. *Catalysis Today*, 2023, 420: 114084.
- [42] FAN S C, ZHANG Y, LIU T, et al. Microwave-assisted pyrolysis of polystyrene for aviation oil production [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2022, 162: 105425.
- [43] ISLAM K M O, AHMAD N, UMMER A C, et al. Microwave-assisted pyrolysis of waste plastics: A comprehensive review on process parameters, catalysts, and future prospects [J]. *Results in Engineering*, 2025, 26: 105571.
- [44] MA Q, GAO Y J, SUN B, et al. Grave-to-cradle dry reforming of plastics via Joule heating [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 8243.
- [45] DONG Q, LELE A D, ZHAO X P, et al. Depolymerization of plastics by means of electrified spatiotemporal heating [J]. *Nature*, 2023, 616(7957): 488-494.
- [46] 吕行, 李凤, 李淑清, 等. 催化热解废塑料实现资源化利用研究进展[J]. *低碳化学与化工*, 2025, 50(10):47-55.
- LV X, LI F, LI S Q, et al. Research progress on catalytic pyrolysis waste plastics for resource utilization [J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2025, 50(10): 47-55.
- [47] WU X T, LIU X Y, SONG Y, et al. A minimalist design for a dual-catalyst system for high-efficiency conversion of waste plastics into liquid fuel products [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2025, 147(25): 21907-21915.
- [48] CEN Z Y, HAN X, LIN L F, et al. Upcycling of polyethylene to gasoline through a self-supplied hydrogen strategy in a layered self-pillared zeolite [J]. *Nature Chemistry*, 2024, 16(6): 871-880.
- [49] ZHANG F, ZENG M, YAPPERT R D, et al. Polyethylene upcycling to long-chain alkylaromatics by tandem hydrogenolysis/aromatization [J]. *Science*, 2020, 370(6515): 437-441.
- [50] ZHANG W, KIM S, WAHL L, et al. Low-temperature upcycling of polyolefins into liquid alkanes via tandem cracking-alkylation [J]. *Science*, 2023, 379(6634): 807-811.
- [51] JIE X Y, LI W S, SLOCOMBE D, et al. Microwave-initiated catalytic deconstruction of plastic waste into hydrogen and high-value carbons [J]. *Nature Catalysis*, 2020, 3(11): 902-912.
- [52] WANG S X, SUN Y B, SHAN R, et al. Polypropylene pyrolysis and steam reforming over Fe-based catalyst supported on activated carbon for the production of hydrogen-rich syngas [J]. *Carbon Resources Conversion*, 2023, 6(3): 173-182.
- [53] YAO D D, YANG H P, CHEN H P, et al. Co-precipitation, impregnation and so-gel preparation of Ni catalysts for pyrolysis-catalytic steam reforming of waste plastics [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2018, 239: 565-577.
- [54] SELVAM E, YU K W, NGU J, et al. Recycling polyolefin plastic waste at short contact times via rapid joule heating [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 5662.

- [55] ZHAO J, LIU B N, XIONG L Q, et al. Highly selective upcycling of plastic mixture waste by microwave-assisted catalysis over Zn/b-ZnO [J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 1726.
- [56] CONK R J, STAHLER J F, SHI J X, et al. Polyolefin waste to light olefins with ethylene and base-metal heterogeneous catalysts [J]. *Science*, 2024, 385(6715): 1322-1327.
- [57] LIU Y Y, MA B, TIAN J Q, et al. Coupled conversion of polyethylene and carbon dioxide catalyzed by a zeolite-metal oxide system [J]. *Science Advances*, 2024, 10(15): eadn0252.
- [58] ANUAR S S D, ABNISA F, WAN DAUD W M A, et al. A review on pyrolysis of plastic wastes [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 115: 308-326.
- [59] ZHANG H W, CHEN H, LI Y C, et al. Boosting light olefin production from pyrolysis of low-density polyethylene: A two-stage catalytic process [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2024, 117: 101872.
- [60] KIM J K, SONG S H, KIM D K, et al. Characteristics of waxy oils from the pyrolysis of waste polyethylene and polypropylene using a new-type fluidized bed reactor [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 396: 128179.
- [61] KAMINSKY W. Chemical recycling of plastics by fluidized bed pyrolysis [J]. *Fuel Communications*, 2021, 8: 100023.
- [62] KIM J K, PARK K B, KIM D K, et al. Direct production of olefins from waste plastic using a pyrolysis and fluid catalytic cracking integrated process: Part 1. Study on the production and analysis of waxy oil obtained using a new type of a fluidized bed reactor [J]. *Energy*, 2024, 306: 132420.
- [63] HASAN M M, RASUL M G, JAHIRUL M I, et al. Characterization of pyrolysis oil produced from organic and plastic wastes using an auger reactor [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 278: 116723.
- [64] 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.
- [65] ZHANG Y, JI G, CHEN C, et al. Liquid oils produced from pyrolysis of plastic wastes with heat carrier in rotary kiln [J]. *Fuel Processing Technology*, 2020, 206: 106455.
- [66] 王红秋, 付凯妹. 新形势下我国废塑料回收利用产业现状与思考[J]. *塑料工业*, 2022, 50(6): 38-42.
- WANG H Q, FU K M. Status and thinking of plastic wastes recycling industry in China under the new situation [J]. *China Plastics Industry*, 2022, 50(6): 38-42.
- [67] APICELLA B, CERCIELLO F, MIGLIACCIO R, et al. Chemical characterization of liquid products from the pyrolysis of plastic wastes [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2025, 190: 107153.
- [68] HASAN M M, RASUL M G, JAHIRUL M I, et al. An Aspen plus process simulation model for exploring the feasibility and profitability of pyrolysis process for plastic waste management [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 355: 120557.
- [69] 王冠宇. 塑料固废热解特性及协同转化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- WANG G Y. Study on the pyrolysis characteristics and synergistic conversion of plastic solid waste [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [70] 于丹, 张彦军, 杜闰萍, 等. 一种废塑料热解产物完全利用的系统及方法: 119912959A [P]. 2025-05-02.
- YU D, ZHANG Y J, DU R P, et al. A system and method for complete utilization of pyrolysis products of plastic wastes: 119912959A [P]. 2025-05-02.
- [71] 陈强, 徐英志, 张金庆, 等. 一种用于混合废塑料轻重分离的气流干燥塔: 120488694A [P]. 2025-08-15.
- CHEN Q, XU Y Z, ZHANG J Q, et al. An airflow drying tower for light and heavy separation of mixed plastic wastes: 120488694A [P]. 2025-08-15.
- [72] 黄丽敏, 程钰丹, 程薇. 废塑料化学循环产业链建设分析[J]. *石油石化绿色低碳*, 2024, 9(5): 21-29.
- HUANG L M, CHENG Y D, CHENG W. Building of chemical recycling industry chain for plastic waste [J]. *Green Petroleum & Petrochemicals*, 2024, 9(5): 21-29.
- [73] 佛山市发展和改革局. 全国生态日: 佛山绿色实践典型案例 [EB/OL]. (2025-08-18)[2025-12-29]. [https://fsdr.foshan.gov.cn/gkmlpt/content/6/6689/post\\_6689490.html#68](https://fsdr.foshan.gov.cn/gkmlpt/content/6/6689/post_6689490.html#68).
- Foshan Municipal Bureau of Development and Reform. National Ecology Day: Exemplary cases of green practices in Foshan [EB/OL]. (2025-08-18)[2025-12-29]. [https://fsdr.foshan.gov.cn/gkmlpt/content/6/6689/post\\_6689490.html#68](https://fsdr.foshan.gov.cn/gkmlpt/content/6/6689/post_6689490.html#68).