高分子材料科学与工程
POLYMER MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING

http://pmse.scu.edu.cn

# 废旧塑料化学催化合成增值化学品研究进展

熊兴泉[1]，林妙兰[1]，张辉[1,2]，高利柱[1]

(1. 华侨大学 材料科学与工程学院，福建 厦门 361021；2. 中国科学院上海高等研究院，上海 201204)

**摘要：**随着塑料产量激增，废旧塑料的处理成为全球关注的焦点。通过化学催化反应将废旧塑料合成增值化学品，不仅能缓解环境压力，还能实现资源高效利用，具有重要意义。本文综述了近年来采用光催化、催化氢解、催化热解、酸催化等化学催化方法，针对聚苯乙烯（PS）、聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）、聚乙烯（PE）及聚丙烯（PP）等常见废旧塑料，开展化学催化合成增值化学品的研究进展。同时，对该领域发展趋势进行了展望，指出开发高效、绿色的催化体系和实现工业化应用将是未来的研究重点。

**关键词：**废旧塑料；化学催化；增值化学品；合成

塑料因性能多样、适用性广成为不可或缺的材料，全球年产量超 4 亿吨[1,2]。但塑料化学结构稳定、自然降解慢，大量废旧塑料形成白色污染，严重破坏生态环境。以废旧塑料为原料，采用化学催化反应合成增值化学品受到广泛关注。该技术采用高效催化剂将废旧塑料转化为增值化学品，如单体、燃料等。这些化合物可作为重要化工原料，重新投入到塑料合成、能源生产以及其他化工产品的制造中，实现废旧塑料的资源化循环利用。

近年来，高效光催化剂、金属催化剂等不断涌现，提升了塑料转化反应的活性与选择性[3-5]。本文综述了近年来采用光催化、催化氢解、催化热解、酸催化等化学催化方法，针对聚苯乙烯（PS）、聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）、聚乙烯（PE）及聚丙烯（PP）及聚氯乙烯（PVC）等常见废旧塑料，开展化学催化合成高附加值有机化合物的研究进展。探讨了反应温度、压力、催化剂用量等因素对转化反应的影响。同时，对该领域未来发展趋势进行了展望，指出开发高效、绿色的催化体系和实现工业化应用将是未来的研究重点。

## 1 光催化转化

光催化技术因为有着能耗低、反应条件温和等优点，被广泛应用于有机合成中[6-8]。近年来，光催化技术为废旧塑料处理提供了一种简便且绿色的解决方案。它不仅能显著加快废旧塑料在自然环境中的降解速率，还可将其转化为具有高附加值的化学品。

2023 年，Miao 等[9]将光热催化技术应用于聚烯烃塑料回收，利用二氧化硅负载钌纳米颗粒（$Ru/TiO_2$）催化剂的全光谱吸光特性与 Ru 纳米颗粒的氢解活性，实现在无溶剂条件下废旧 PE、PP 塑料向高价值

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0137
收稿日期：2025-09-23
基金项目：福建省高校新世纪优秀人才支持计划；华侨大学中青年教师科研提升资助计划 (ZQN-YX103) ；福建省自然科学基金资助项目 (2021J01294)
通讯联系人：熊兴泉，主要从事有机合成以及废旧塑料资源化利用研究，E-mail: xxqluli@hqu.edu.cn

液态燃料的定向转化。通过优化 Ru/$TiO_2$ 上光热反应的温度和压力，废旧 PE 等塑料可高选择性地转化为有价值的液态烃。在可见光和近红外光照射下，Ru/$TiO_2$ 局部加热使聚合物熔融，实现催化剂与聚烯烃的紧密接触，并提供反应温度以促使 Ru 位点上高效的 C-C 键断裂。使用 Ru/$TiO_2$ 催化剂，在 300 ℃条件下，3 小时内即可将废旧塑料完全转化为汽油和柴油馏分（C5–C21），选择性可达 86%。该技术突破传统回收能耗高、产物附加值低的瓶颈，适用于多种废旧 PE、PP 等商用塑料袋，为太阳能驱动的塑料废弃物高效回收铺平了道路。

随后，Chu 等[10]开发了一种可见光驱动的铋系氧化物（BiOI/$BiVO_4$） p-n 异质结光催化体系，实现 PE 向长链二元酸（C10-C30）的高效转化。在温和条件下，长链二元酸的产率可提升至 75%（Fig.1）。研究表明，超氧自由基（•$O_2^-$）激活 PE 主链中的 C-H 键，而羟基自由基（•OH）则切断 C=C 键。对于日常废旧的多种 PE 产品，该光催化升级方法都表现出显著的效率。与传统技术相比，该方法无需高温高压或强氧化剂条件，能耗降低 60%以上，产物可直接用于尼龙等合成，为 PE 废物高值化利用提供了绿色路径。

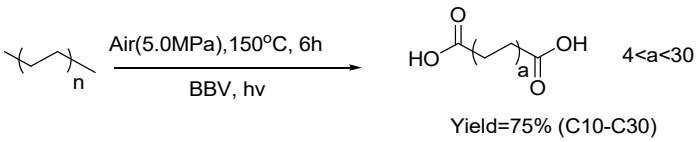



**Fig. 1　Conversion of PE to long-chain dicarboxylic acids (C10-C30)[10]**

2025 年，Xu 等[11]采用 “一锅两步法” 成功实现废弃 PS 的氧化降解，以较高的收率制备出苯甲酸（Fig.2）。该方法以 $CuCl_2$ 作为催化剂，在室温条件下使用蓝色 LED 照射及 $O_2$ 环境中促使废弃 PS 发生氧化裂解反应，生成被氧化的苯乙烯低聚物以及苯甲酸。随后，在 Cu（$NO_3$）$_2$·$3H_2O$ 催化及加热条件下，所得被氧化的苯乙烯低聚物可进一步转化为苯甲酸。通过该 “一锅两步” 工艺，废弃 PS 被高效氧化降解，苯甲酸总收率高达 65%。该方法成功应用于克量级规模废旧 PS 泡沫的降解，显示出 “一锅两步法” 良好的应用潜力。

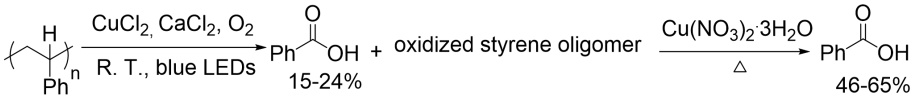



**Fig. 2　Oxidative degradation of PS into benzoic acid[11]**

同年，Wang 等[12]结合可见光触发策略，实现商用聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）的高效解聚。该技术通过溶剂中氯自由基（Cl•）引发主链氢原子转移（HAT），直接在主链多位点发生解聚。以 415 nm 可见光激发 1,2 -二氯苯等含氯溶剂产生 Cl•，仅在光照时触发解聚，实现时间精准控制。反应在 90–150 °C 低温下即可进行，显著低于传统热解所需的 400 °C 以上温度，大幅降低能耗与副产物生成。

该技术对复杂体系展现出高耐受性，适用于高分子量（$10^6$ g/mol）、含共聚单体或添加剂的 PMMA，不同合成路径制备的 PMMA 均能有效解聚。研究实现超 10 g 规模解聚，单体纯度达 99%，溶剂可循环使用 5 次以上，单体回收率接近定量。

随后，Jiang 等[13]开发光热转化技术，实现聚 PVC 与 PS 协同回收，为两类难降解塑料的高值化利用开辟新路径（Fig.3）。在光照下 PVC 分解产生的 HCl 作为氯源，促使苯乙烯氢氯化生成重要工业中

间体 1-氯乙基苯。PVC 脱氯化氢后形成的脱氯化氢聚氯乙烯（DHPVC）作为光热剂，吸收光能转化为热能加速反应。在该转化过程中，仅需 0.5%炭黑辅助，在 2.24 W/cm$^2$ 白光 LED 照射下，1 小时内即可将苯乙烯几乎定量转化为 1-氯乙基苯，产率达 89%。即使使用含增塑剂的废旧 PVC 或混合 PS 塑料，1-氯乙基苯产率仍达 84%。在聚焦阳光下，反应速度显著提升，4 分钟内即可生成 42%的 1-氯乙基苯。

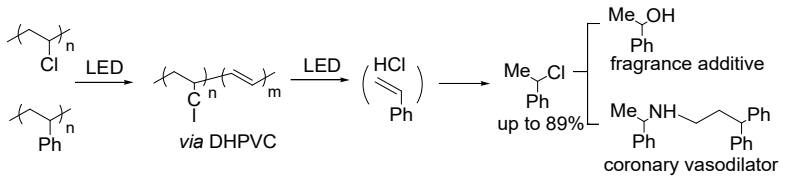



**Fig. 3　Utilization of photothermal conversion technology for the synergistic recycling of PVC and PS[13]**

近期，Zhang 等[14]利用负载原子级分散 Pd 的 $TiO_2$ 光催化剂，将 PET 废料解聚得到的乙二醇高效转化为乙醇醛（Fig.4）。单原子 Pd 位点促进光生电子/空穴对分离，富集的空穴作为乙二醇氧化的关键活性物种，驱动选择性氧化反应。Pd 原子增强乙二醇分子吸附，促进生成乙醇醛的关键中间体 RO•自由基，并降低乙醇醛的解吸能垒，抑制其过度氧化为 $CO_2$。在最优条件下，乙醇醛产率可达 5072 μmol $gcat^{-1}$ $h^{-1}$，选择性高达 90%，且催化剂具有良好的稳定性。本研究突破了传统光重整对 C2 产物选择性低的瓶颈，为废旧 PET 太阳能驱动升级回收提供了新策略，显示了负载型原子级催化剂在光催化转化中的关键作用。

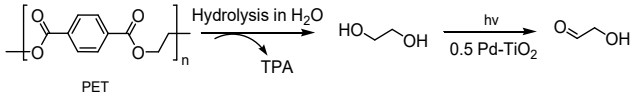



**Fig. 4　Supported Pd catalyzing the depolymerization of PET waste to prepare EG[14]**

最近，Zhang 等[15]开发了一种基于可见光驱动的有机光催化塑料升级回收方法，以苯并噻嗪衍生物 PTH-3CN 作催化剂，可选择性解聚 PS、PE 等废旧塑料，以低至 500 ppm 的催化剂用量将其转化为苯甲酸等（Fig.5）。在常温空气条件下，该反应仅需可见光照射即可进行，无需额外添加酸或金属，对混合塑料及废旧塑料均表现出良好适应性。PTH-3CN 作为预催化剂分解生成活性三芳胺物种，通过连续光诱导电子转移机制驱动聚合物高效降解，避免了传统回收中高温、强腐蚀等苛刻条件的局限性。

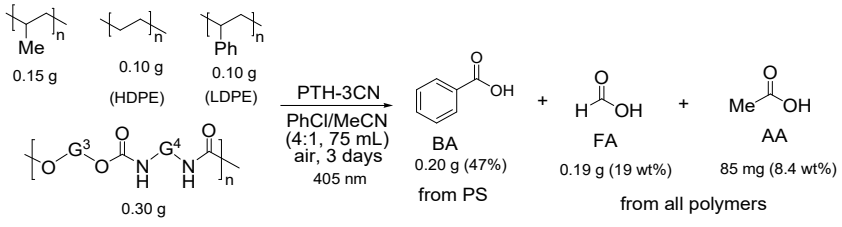



**Fig. 5　PTH-3CN catalyzing the conversion of waste plastics into organic molecules such as benzoic acid[15]**

## 2　催化氢解转化

在 $H_2$ 条件下，负载型 Ru、Pt 等异相催化剂能有效破坏聚烯烃主链中的 C-C 键，制备出燃料范围

的碳氢化合物[16-21]。目前，通过氢解将废旧塑料升级为增值化学品主要集中在 PE、PP 和 PET 等上。2023 年，Li 等[22]报道了一种选择性地将废旧塑料转化为石脑油的串联催化方法，这种升级策略有助于更有效地提升废旧塑料的价值。该团队采用活性金属限域的纯硅沸石-铂（Pt@S-1）与酸性β分子筛串联催化机制，选择性将 PE 加氢裂化为石脑油。在 250°C、3MPa $H_2$ 压力和无溶剂条件下，采用机械混合的β沸石和 Pt@S-1 催化剂催化低密度聚乙烯（LDPE）一锅加氢裂解，得到石脑油液相产物收率最高可达到 89.5%，其中 C5-C9 烷烃的选择性高达 96.8%。

然而，在解聚过程中的杂质，如来自 PVC 的含氯物质，能使贵金属催化剂中毒。基于此，Duan 等[23]开发一种直接、低温且不含贵金属的催化方法选择性地将 PE 转化为窄分布的烯烃（$C_3$-$C_6$ 烯烃）。通过将 PE 与沸石纳米片 ZSM-5 在 280 °C 条件下与氢气混合，以高达 74.6%的产率制备出轻质烃（C1-C7），其中 83.9%的产物是 C3-C6 烯烃。同年，Wang 等[24]采用催化串联工艺，结合加氢热解与下游气相加氢处理技术，将生活中混合塑料废物回收升级为燃料。在 300 °C 和 0.3 MPa $H_2$ 条件下，通过非贵金属双功能 $Ni/NiAl_2O_4$ 催化剂将护目镜等进行加氢处理以 88.9 wt%的产率制备出液体燃料。这种催化级联气相加氢处理方法的能源效率高达 94%。

将废旧塑料升级为液体燃料在推进循环经济方面具有显著潜力，但受到选择性差和低价值甲烷副产品形成的影响。2025 年，Yan 等[25]利用掺杂 Ru 原子的氧化锆催化剂（Ru-O-Zr ）选择性地将 PE 和 PP 废塑料转化为液体燃料。采用 100 克废旧塑料为原料，在无溶剂加氢裂化过程中可制备 85 毫升液体混合物。该混合物由约 70%的喷气燃料级支链烃（C8-C16）组成，而气体产物是 C3-C6 的石油气。Ru-O-Zr 中的 Ru 掺杂剂使其相邻的 O 原子官能化，形成了 Brønsted 酸位点。该 Brønsted 酸位点选择性地引发聚烯烃内部 C-C 键断裂，从而提高了喷气燃料级烃的产量并抑制了甲烷的形成。

同年，Zhu 等[26]利用分子筛负载铂催化剂 PtW/MCM-48，通过精准调控中等酸性位点，实现对废 PET 一锅法选择性加氢制备对甲基苯甲酸（p-TA，产率 53.4%）和对二甲苯（PX，产率 36.4%）（Fig.6）。该催化剂良好的催化性能源于 Pt 纳米颗粒与低聚合态多钨酸盐 WOx 之间的协同相互作用，WOx 增强 Pt 纳米粒子的分散性，Pt 稳定 WOx，而 Pt 纳米粒子则通过氢溢出使 WOx 稳定在低聚合的多钨酸盐形态。该催化剂稳定性高且易于分离，经表征与 DFT 计算证实，其催化活性源于 Pt 纳米粒子与 WOx 物种的协同作用，而优化的 Pt/W 比例则赋予催化剂适度的中等酸性位点。

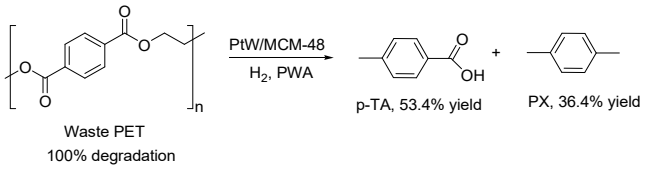



**Fig. 6 PtW/MCM-48 catalyzing the conversion of waste PET into p-TA and PX[26]**

合成抗冲击、耐热且高透明度的高端聚酯时，1,4-环己烷二甲醇（CHDM）是不可或缺的关键单体。2025 年，Fang 等[27]开发了以水为溶剂、将 PET 转化为 HDM 的环保经济途径（Fig.7）。该过程中，PET 在水中依次经水解、氢化生成 1,4-环己烷二羧酸（CHDA），再还原为 CHDM。第一步使用 Pd/C 催化剂，选择性氢化 PET 中的芳烃环及对苯二甲酸中间体，实现 PET 完全转化，对 CHDA 和 4-羟甲基环己甲酸（HMCA）选择性达 95%，抑制副产物环己甲酸（CCA）和 4-甲基环己甲酸（MHA）生成。

第二步采用 Ru-Sn/C 双金属催化剂将 CHDA 和 HMCA 还原为 CHDM，总产率 92.3%。两步法在单一反应器中依次进行时，CHDM 产率达 80.1%，且可同步生产高达 86.4%的 CHDA。反应需控制时间以避免过度还原为其他醇类。

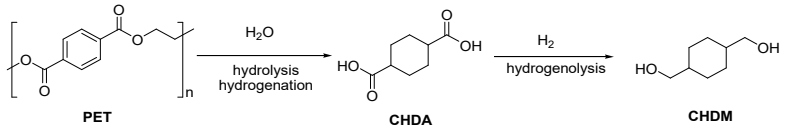



**Fig. 7　Conversion of PET to CHDM *via* hydrolysis and hydrogenation[27]**

同年，Huang 等[28]开发出一种全新的两步催化工艺，采用具有碱位点和富电子金属活性位点的抗 CO 中毒的双功能钌/二氧化锰（$Ru/MnO_2$）与铜锌锆（CuZnZr）混合氧化物催化体系，实现了串联甲醇解和苯环加氢反应，在较低温度下将 PET 一锅转化为 DMCD（Fig.8）。在串联 “醇解-加氢” 过程中，$Ru/MnO_2$ 凭借良好的低温甲烷化活性展现独特催化能力，通过拉动反应平衡显著降低解聚温度，该催化剂可实现 84%的 DMCD 收率。使用 CuZnZr 混合氧化物催化剂，最优条件下 CHDM 的产率超过 96%。PET 制备 CHDM 的总产率达到 78%，且无需分离中间产物。

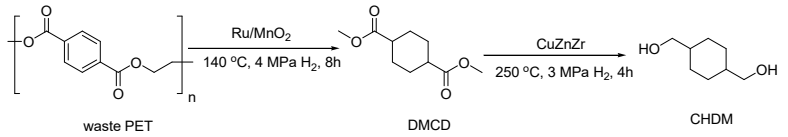



**Fig. 8　Tandem alcoholysis-hydrogenation for the preparation of CHDM[28]**

随后，Qu 等[29]以缺陷型磺酸功能化的 UiO-66def-$SO_3H$ 为载体，制备了负载型 Ru 基催化剂 Ru/UiO-66def-$SO_3H$，并将该催化剂用于废弃 PET “一锅多步”法化学升级制备 CHDM （Fig.9）。以 PET 为原料，在 m（cat.）/m（PET）=0.05 $g \cdot g^{-1}$，170 °C，3 MPa $H_2$ 条件下反应 6 h，PET 转化率可达 100%，DMCD 产率为 97.7%。该催化体系对废弃的饮料瓶等直接化学升级为 CHDM 反应中也具明显的催化活性。“一锅多步”法首先需在催化剂酸性中心的作用下，通过醇解解聚生成中间体 DMCD，随后 DMCD 进一步加氢获得 CHDM。而实现上述步骤有效衔接的关键，在于催化剂的酸性、加氢活性、介孔结构与表面亲疏水性之间的高效协同。

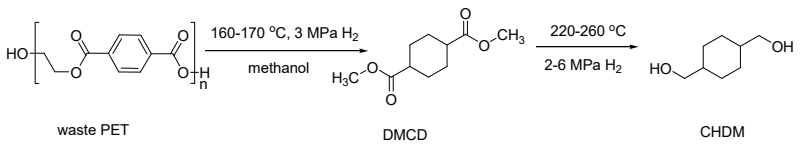



**Fig. 9　Ru/UiO-66def-$SO_3H$ catalyzing the conversion of waste PET into CHDM[29]**

近期，Hu 等[30]设计合成新型三齿钳形锰催化剂，首次实现复合聚酯纤维废弃物催化加氢升级（Fig.10）。该催化剂催化活性优异，在 80-100 °C、0.5 MPa $H_2$ 的温和条件下，可将聚酯废弃物氢解为二醇类产物，催化剂转化数可达 5300，选择性 100%。其底物兼容性好，不仅适用于单组分聚酯，还能将含多种杂质的混合废弃聚酯塑料选择性转化为高价值含氧化学品，收率 89%-98%，并完成 15 克级放大实验。机理研究显示，催化剂通过拓展π体系和引入侧链 N-H 官能团，形成双重金属-配体协同作用，促进关键反应步骤，提升稳定性与活性。

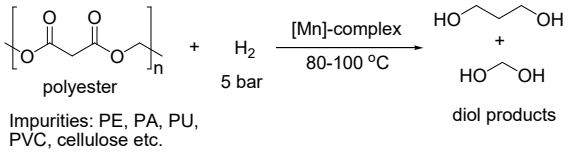



**Fig. 10　Novel tridentate pincer manganese catalyst catalyzing the conversion of waste PET into diol products[30]**

## 3 催化热解转化

塑料热解的主要优点是能够将塑料垃圾转化为低分子量产品，用作燃料或塑料再生的原料。2024年，Zhao 等[31]报道的聚苯乙烯类材料氮化升级回收策略，通过 $MnO_2$ 催化、尿素供氮、$O_2$ 氧化体系，在 200 °C 温度下将聚苯乙烯类材料选择性转化为腈和酰胺等高价值化学品。该课题组以市售的 $MnO_2$ 为催化剂，以尿素为氮源，以 $O_2$ 为氧化剂, PS 可转化为苯甲腈和苯甲酰胺（Fig.11）。通过对比不同的催化剂和氮源, 证明 $MnO_2$ 和尿素具有廉价易得和适用性好等优点。苯甲醛和苯甲酸是该反应的关键中间体，分别会转化为苯甲腈和苯甲酰胺。作者在对废旧 PS 材料（包括塑料泡沫、杯子和盖子）在克级水平上均可选择性地降解为苯甲腈和苯甲酰胺，总产率在 30-55% 之间。

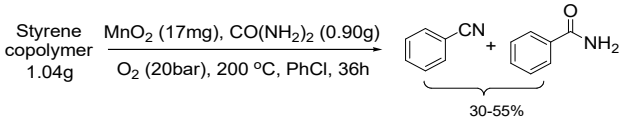



**Fig. 11　Selective conversion of polystyrene-type materials to nitriles and amides *via* $MnO_2$ catalysis[31]**

同年，Andini 等[32]在 ZnO 催化剂作用下，通过微波辅助加热对 PET 纤维进行乙二醇解。研究样品为采购得到 100%聚酯纺织品、100%棉纺织品以及 50/50 聚酯和棉混纺织品。聚酯纺织品乙二醇解后对苯二甲酸双羟乙酯 BHET 产率达 90%，100%棉纺织品质量损失仅约 7.8%。50/50 聚酯/棉混纺织品经 15 分钟微波乙二醇解，溶液呈淡黄色，45 分钟时棉分解使溶液变深橙色。该策略可在短时间内将聚酯完全解聚，部分回收组分可用于纺织品制造。

2025 年，Zeng 等[33]采用预氧化诱导的 PS 塑料氮化降解策略, 利用 CuBr 为催化剂、$O_2$ 为氧化剂、$CH_3CN$ 为氮源, 将多种生活中的 PS 废弃物选择性升级循环为高附加值的苯甲腈和苯甲酰胺等芳香氮化合物 （Fig.12）。结果表明，CuBr 起到关键作用，$CH_3CN$ 既是溶剂又是氮源。另外，在反应体系中加入适量水可提高产物产率。结果表明，在 CuBr（10 mol %）、$CH_3CN$（0.5mL）、$H_2O$（40 μL）、$O_2$（2 MPa）、200 ºC 的条件下反应 10 h，苯甲腈产率为 31%，苯甲酰胺产率为 40%。降解发生的关键原因是 $O_2$ 活化产生的羟基自由基。

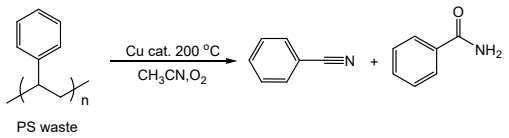



**Fig. 12　Strategy for pre-oxidation-induced nitridation degradation of PS to synthesize benzonitrile and benzamide[33]**

同年，Qiu 等[34]使用廉价易得的 $AlCl_3$/NaCl 熔融盐作为反应介质，在温度低于 200 °C、无溶剂、无氢气及无贵金属的条件下，实现了 PE 向液态烷烃（支链化的 C6-C12 烷烃）的高效与高选择性升级转化（Fig.13）。该课题组通过实验发现，在 $AlCl_3$/NaCl 比例为 2:1 的条件下，可有效将 PE 转化为液态烷烃（产率 63%，C6-C12）。研究表明，熔盐中 Lewis 酸性较强的 Al 活性位点以及熔盐所具有的离子特征保证了具有较高的催化效率和较高的选择性，因此能够稳定碳正离子中间体。

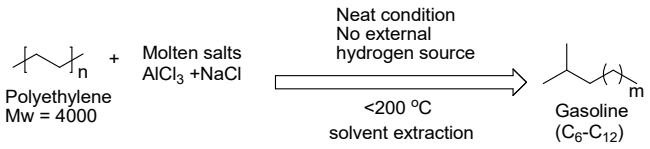



**Fig. 13　Efficient and highly selective upgrading conversion of PE to C6-C12 alkanes[34]**

Munyaneza 等[35]采用热化学法优化回收流程，探索出温和条件下将 PS 转化为芳香羰基化合物和有机硫化物的回收方法（Fig.14）。优化路线中，PS 先经三氯化铝热催化分解为苯，产率较原光化学过程提升约 10 mol%，芳环回收率接近 100 mol%。随后，将烷基氯或酰氯化合物掺入分解产物，借助三氯化铝催化获得 8 种高价值芳香羰基化合物。此外，通过芳基亚砜原位还原反应，磺酰氯与苯混合可制得芳基硫醚。该 PS 回收法高效、选择性强且产物价值高。

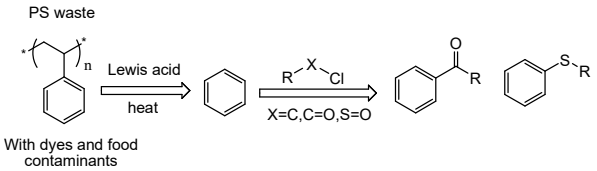



**Fig. 14　Conversion of PS to aromatic carbonyl compounds and aromatic sulfides *via* thermochemical method[35]**

## 4 酸催化转化

Zhang 等[36]报道了一种氯铝酸型离子液体[$C_4$Py]Cl-$AlCl_3$ 将废旧聚烯烃催化升级为液体燃料的策略。通过离子液体催化裂解和烷基化相结合的级联反应，在低于 100 °C 的温度下使聚烯烃塑料分解成液体燃料。该小组使用商用 LDPE 作为底物，在 70 °C 条件下反应 3 小时，让 LDPE 实现了 100%转化率。转化所得产物中，70%是具有高抗震爆值的支链型 C6-C12 液态烷烃，其余的 C4 能够继续作为烷基化试剂参与反应，从而实现整个 LDPE 的全转化。整个反应的表观活化能约为 17 kJ/mol，远低于迄今报道的 PE 降解活化能垒 163-303 kJ/mol。[$C_4$Py]Cl-$AlCl_3$ 同时被作为反应的介质以及催化剂，它能稳定碳正离子过渡态，从而降低反应的能垒，进而大大提高反应性。

2025 年，Wang 等[37]开展了碳正离子作为无金属 Lewis 酸催化剂用于聚乳酸（PLA）等聚酯醇解的研究（Fig.15）。针对环庚三烯四氟硼酸盐[$C_7H_7$]$^+$[$BF_4$]$^-$、三苯甲基四氟硼酸盐[$Ph_3C$]$^+$[$BF_4$]$^-$ 和三苯甲基四 （五氟苯基） 硼酸盐[$Ph_3C$]$^+$[B （$C_6F_5$）$_4$]$^-$三种碳正离子试剂在聚酯醇解中的催化性能，该小组以 PLA 树脂 R190 为原料，于 120 °C 条件下的甲醇解反应为模型进行考察。结果表明，当使用 5 mol%的[$Ph_3C$]$^+$[B （$C_6F_5$）$_4$]$^-$时，1 小时内即可实现 PLA 基本完全转化为乳酸甲酯（MLA），催化活性最优，这一现象可能归因于该试剂最强的 Lewis 酸性。

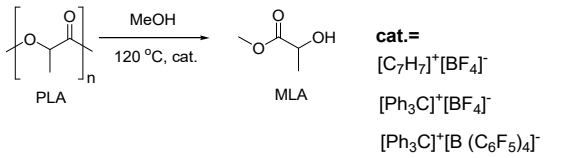



**Fig. 15 Carbocations as metal-free Lewis acid catalysts for the alcoholysis of PLA[37]**

近期，Li 等[38]开发了一种简单高效、普适性好的废弃环氧树脂（EPs）全回收策略。该策略利用市售廉价的硼路易斯酸，在温和条件下选择性地断裂 EPs 中的 C（sp3）-O 键，以此高效回收双酚 A（BPA），同时借助 C （sp3）-N 键的重构及羟基环化反应，将 EPs 中除 BPA 外的部分转化为多官能度环氧树脂单体，如 AG80 等。实验表明，EP 的质量回收率高达 91%，BPA 产率最高达 96%，纯度为 99%，AG80 等环氧树脂单体产率高达 96%，环氧值为 0.43。此方法不仅能处理纯环氧树脂，还可推广到环氧树脂复合材料，在回收 BPA 时，能无损回收复合材料中多种填料。

Zhao 等[39]利用路易斯酸 $MgCl_2$，在温和条件下实现多种聚酯材料解聚回收原始化学单体，为聚酯闭环回收提供方案（Fig.16）。该催化剂可在低于聚酯分解温度下，高效解聚聚酯、聚碳酸酯等多种塑料，单体回收率超 90%，还能选择性处理多种塑料混合物、聚酯混合物及随机共聚物 （单体产率均>90%）。机理研究表明，催化体系分解涉及随机链断裂和末端环化反应, 有利于解聚回收的高选择性和高效率。

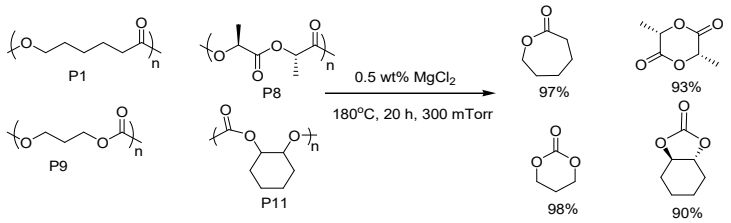



**Fig. 16 $MgCl_2$-catalyzed depolymerization of various polyester materials for recycling of chemical monomers[39]**

2025 年，Xu 等[40]提出有机-无机酸催化体系 FA-PW12，可在温和条件下回收废旧聚酯塑料。作者以甲酸为溶胀溶剂、钨基多金属氧酸盐为催化剂，PET、PBT 等废弃聚酯在低于 100 °C 下可完全分解为单体，且在低酸浓度（0.1-0.3 mol/L）、低温下能有效分解聚酯塑料，较传统工艺有经济优势。DFT 显示 PW12 进攻聚酯中的羰基碳，导致聚酯被催化裂解。使用 FA-PW12 作为催化剂，PET 和 PBT 水解活化能分别为 94.5 kJ·mol$^{-1}$ 和 73.9 kJ·mol$^{-1}$，其水解活化能低于常见无机强酸，固溶比提高至 0.4g/mL 时转化率超 90%。

## 5 结语与展望

废旧塑料的化学升级回收通过高效光催化剂、金属催化剂等将废旧塑料降解为高附加值有机化合物，为缓解塑料污染与提升资源利用率提供了创新路径。目前，该领域已实现聚烯烃、聚酯等废旧塑料向液态烃、燃料组分及化学品单体的转化。然而，领域发展仍面临关键挑战: （1）部分工艺的目标产物选择性不足，副反应多导致成本上升; （2）光催化材料易光腐蚀，循环使用活性衰减显著; （3）混合塑料的定向解聚缺乏通用技术，依赖高成本分拣。展望未来，一方面需开发原子级分散催化剂与

多功能复合催化材料，通过机器学习优化催化参数，提升选择性并降低反应温度。另外，设计具有多重活性位点的催化剂，实现不同聚合物同步定向解聚，避免分拣依赖。总之，通过跨学科技术融合与政策赋能，废旧塑料化学升级回收有望从实验室走向工业化，实现塑料废弃物的高效绿色转化，为“双碳”目标与循环经济提供核心支撑，最终将“白色污染”转化为“可持续资源”。

**参考文献：**

[1] Bachmann M, Zibunas C, Hartmann J, et al. Towards circular plastics within planetary boundaries[J]. Nature Sustainability, 2023, 6: 599-610.

[2] Hu Q, Zhang Z, He D, et al. Progress and perspective for “green” strategies of catalytic plastics conversion into fuels by regulating half-reactions[J]. Journal of the American Chemical Society, 2024, 146: 16950-16962.

[3] Wang H, Smith Jr R L, Qi, X. Upcycling of monomers derived from waste polyester plastics *via* electrocatalysis[J]. Journal of Energy Chemistry, 2025, 101: 535-561.

[4] Sajwan D, Sharma A, Sharma M, et al. Upcycling of plastic waste using photo-, electro-, and photoelectrocatalytic approaches: a way toward circular economy[J]. ACS Catalysis, 2024, 14: 4865-4926.

[5] Wimberger L, Ng G, Boyer C. Light-driven polymer recycling to monomers and small molecules[J]. Nature Communications, 2024, 15: 2510.

[6] 周闯, 李普旺, 李思东, 等. UV 光催化桐油基多元醇的制备及超支化聚氨酯的表征[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(1):159-166.

Zhou C, Li P W, Li S D, et al. Preparation of tung oil-based polyol *via* UV photocatalysis and its application on hyperbranched polyurethane[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(1): 159-166.

[7] 李邦森, 石建军, 孙天一, 等. 无金属有机光催化原子转移自由基聚合的研究现状[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(6): 182-190.

Li B S, Shi J J, Sun T Y, et al. Progress of metal-free organic photocatalytic atom transfer radical polymerization[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(6): 182-190.

[8] 徐雪雯, 李鹏辉, 童国林. 光催化降解木质素机理与影响因素的研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(2): 169-176.

Xu X W, Li P H, Tong G L. Progress on mechanism and influencing factors of photocatalytic degradation of lignin[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(2): 169-176.

[9] Miao Y, Zhao Y, 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.

[10] Chu D, Weng J, Liu X, et al. Photocatalytic oxidation of polyethylene to dicarboxylic acid over BiOI/$BiVO_4$ p–n heterojunction under visible light[J]. CCS Chemistry, 2025, 7: 3519-3529.

[11] Xu E, Liu T, Xie F, et al. Aerobic oxidation of alkylarenes and polystyrene wastes to benzoic acids *via* copper-based catalyst[J]. Chemical Science, 2025, 16: 2004-2014.

[12] Wang H S, Agrachev M, Kim H, et al. Visible light-triggered depolymerization of commercial polymethacrylates[J].

Science, 2025, 387: 874-880.

[13] Jiang H, Medina E A, Stache E E. Upcycling poly (vinyl chloride) and polystyrene plastics using photothermal conversion[J]. Journal of the American Chemical Society, 2025, 147: 2822-2828.

[14] Zhang W, Hao X, Liu X, et al. Photocatalytic conversion of polyester-derived alcohol into value-added chemicals by engineering atomically dispersed Pd catalyst[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2025, 64: e202500814.

[15] Zhang S, Wang J, Su D, et al. Facile visible-light upcycling of diverse waste plastics using a single organocatalyst with minimal loadings[J]. Nature Communications, 2025, 16: 4188.

[16] Zhang F, Zeng M, Yappert R D, et al. Polyethylene upcycling to long-chain alkylaromatics by tandem hydrogenolysis/aromatization[J]. Science, 2020, 370: 437-441.

[17] Tennakoon A, Wu X, Paterson A L, et al. Catalytic upcycling of high-density polyethylene via a processive mechanism, Nature Catalysis, 2020, 3: 893-901.

[18] Jia C, Xie S, Zhang W, et al. Deconstruction of high-density polyethylene into liquid hydrocarbon fuels and lubricants by hydrogenolysis over Ru catalyst[J]. Chem Catalysis, 2021, 1: 437-455.

[19] Kots P A, Liu S, Vance B C, et al. Polypropylene plastic waste conversion to lubricants over $Ru/TiO_2$ catalysts[J]. ACS Catalysis, 2021, 11: 8104-8115.

[20] Liu S, Kots P A, Vance B C, et al. Single pot catalyst strategy to branched products via adhesive isomerization and hydrocracking of polyethylene over platinum tungstated zirconia[J]. Applied Catalysis B: Environment and Energy, 2021, 299: 120483.

[21] Chen L, Meyer L C, Kovarik L, et al. Disordered, sub-nanometer Ru structures on $CeO_2$ are highly efficient and selective catalysts in polymer upcycling by hydrogenolysis[J]. ACS Catalysis, 2022, 12: 4618-4627.

[22] Li L, Luo H, Shao Z, et al. Converting plastic wastes to naphtha for closing the plastic loop[J]. Journal of the American Chemical Society, 2023, 145: 1847-1854.

[23] Duan J, Chen W, Wang C, et al. Coking-resistant polyethylene upcycling modulated by zeolite micropore diffusion[J]. Journal of the American Chemical Society, 2022, 144: 14269-14277.

[24] Wang J, Jiang J C, Dong X Y, et al. Catalytic cascade vapor-phase hydrotreatment of plastic waste into fuels and its sustainability assessment[J]. Green Chemistry, 2022, 24: 8562-8571.

[25] Yan J, Li G, Lei Z, et al. Upcycling polyolefins to methane-free liquid fuel by a $Ru_1$-$ZrO_2$ catalyst[J]. Nature Communications, 2025, 16: 2800.

[26] Zhu Y, Mao Z, Wu W, et al. Selective asymmetric hydrogenation of waste polyethylene terephthalate *via* controlled sorption through precisely tuned moderate acid sites[J]. Journal of the American Chemical Society, 2025, 147: 10662-10677.

[27] Fang S, Gao Z, Shi X, et al. Upcycling of polyethylene terephthalate to 1, 4-cyclohexanedimethanol in water[J]. Science China Chemistry, 2025, 68: 2101-2109.

[28] Huang Y, Si Y, Guo X, et al. Valorization of waste polyester for 1, 4-cyclohexanedimethanol production[J]. ACS Catalysis, 2025, 15: 4570-4578.

[29] Qu W, Ye Y, Zhang Y, et al. Catalytic upgrading of waste PET to dimethyl cyclohexane-1, 4-dicarboxylate over defective

sulfonated UiO-66def-$SO_3H$ supported Ru catalyst[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2025, 71: 363-374.

[30] Hu Y, Gu Y, Dong Y, et al. Selective and efficient upcycling of polyesters from waste plastic blends enabled by a rationally designed manganese pincer catalyst[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2025, 64: e202502923.

[31] Zhao B, Hu Z, Sun Y, et al. Selective upcycling of polyolefins into high-value nitrogenated chemicals[J]. Journal of the American Chemical Society, 2024, 146: 28605-28611.

[32] Andini E, Bhalode P, Gantert E, et al. Chemical recycling of mixed textile waste[J]. Science Advances, 2024, 10: eado6827.

[33] Zeng G, Su Y, Jiang J, et al. Nitrogenative degradation of polystyrene waste[J]. Journal of the American Chemical Society, 2025, 147: 2737-2746.

[34] Qiu L, Polo-Garzon F, Daemen L L, et al. Polyethylene upcycling to liquid alkanes in molten salts under neat and external hydrogen source-free conditions[J]. Journal of the American Chemical Society, 2025, 147: 16207-16216.

[35] Munyaneza N E, Posada C, Xu Z, et al. A generic platform for upcycling polystyrene to aryl ketones and organosulfur compounds[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2023, 62: e202307042.

[36] Zhang W, Kim S, Wahl L, et al. Low-temperature upcycling of polyolefins into liquid alkanes *via* tandem cracking-alkylation[J]. Science, 2023, 379: 807-811.

[37] Wang N, Zhang Q, Sun Z, et al. Recycling polyester and polycarbonate plastics with carbocation Lewis acidic organocatalysts[J]. ACS Macro Letters, 2025, 14: 377-384.

[38] Li X, Liu L, Yu J, et al. Full recovery of epoxy resin wastes into bisphenol A and epoxy monomers *via* Lewis acid[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2025, 137(19): e202422472.

[39] Zhao W, Guo Z, He J, et al. Solvent-free chemical recycling of polyesters and polycarbonates by magnesium-based Lewis acid catalyst[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2024, 64: e202420688.

[40] Xu G, Ge H, He K, et al. Efficient waste polyester plastics recycling in organic-inorganic acid catalytic system[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 511: 161791.

# Progress in the Synthesis of Value-Added Chemicals from Waste Plastics *via* Chemical Catalysis

Xingquan Xiong[1], Miaolan Lin[1], Hui Zhang[1,2], Lizhu Gao[1]

(1. College of Materials Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

**ABSTRACT:** With the surge in plastic production, the disposal of waste plastics has become a global focus. Synthesizing value-added chemicals from waste plastics through chemical catalysis not only alleviates environmental pressure but also achieves efficient resource utilization, making it of great significance. This paper reviewed the research progress in recent years on using main chemical catalytic methods such as photocatalysis, catalytic hydrogenolysis, catalytic pyrolysis, and acid catalysis to synthesize value-added

chemicals from common waste plastics including PS, PET, PE and PP. Meanwhile, the development trends in this field were prospected, indicating that the development of efficient and green catalytic systems and the realization of industrial applications will be the key research focuses in the future.

**Keywords:** waste plastics; chemical catalysis; value-added chemicals; synthesis