中国科学: 技术科学 2026 年 第 56 卷 第 5 期: 1206 ~ 1221
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述

双酚A型聚碳酸酯化学回收进展与趋势

唐靖秋[1,2†], 刘怡[2,3†], 吕佳怡[1,2†], 库尔来·赛力克汗[1,2], 徐日东升[1,2], 邓涵茹[1,2], 涂鑫琳[1,2], 吴泽翔[1,2], 白月[1,2], 张铭浩[1,2], 梅清清[1,2,3*]

1. 浙江大学土壤污染防治与安全全国重点实验室, 杭州 310058
2. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058
3. 长三角智慧绿洲创新中心, 嘉兴 311400
†同等贡献
* E-mail: meiqq@zju.edu.cn

收稿日期: 2025-07-05; 接受日期: 2025-11-13; 网络版发表日期: 2026-01-28
浙江省"尖兵领雁+X"研发攻关计划(编号: 2024C03112, 2024C03128)和国家自然科学基金(批准号: 22209146, 22376183)资助项目

摘要 双酚A型聚碳酸酯(bisphenol A-based polycarbonate, BPA-PC)因其优异的性能而被广泛应用, 但其废弃物在环境中的持续积累已成为温室气体排放与双酚A(bisphenol A, BPA)泄露的重要来源, 高效回收是实现资源循环与减污降碳的关键途径. 本文系统综述了BPA-PC化学回收的最新进展, 重点介绍了催化介导的原位升级策略及定向转化为高附加值化学品路径. 具体而言, 详细阐述了BPA-PC的两大结构单元——BPA和烷基碳酸酯的精准解聚与功能化策略, 涵盖水解、醇解、氨解、氢解等多种方法, 并突出强调了环化、醚化等原位增值反应, 成功获得了芳香烃、酚、烷烃、醚类和碳酸酯等各类高附加值化学品. 此外, 本文明确指出了当前研究从"纯单体再聚合"向"解聚-转化-聚合"一体化的发展趋势, 为复杂废料的高值化利用提供了新的方向. 最后, 在深入剖析催化体系设计、CO_2原位利用、复杂体系适应性等关键挑战后, 提出了构建绿色循环工艺与闭环碳资源系统的前瞻性展望.

关键词 聚碳酸酯, 化学回收, 催化转化, 高值化, 资源循环

1 引言

双酚A型聚碳酸酯(bisphenol A-based polycarbonate, BPA-PC)是一类由双酚A(bisphenol A, BPA)与碳酸酯前体(如光气或碳酸二苯酯)缩聚而成的热塑性高分子材料. 其结构特征表现为芳香族双酚A单元与碳酸酯基(–O–C(=O)–O–)交替连接, 构成具有一定规整性的线性聚合主链. 因其出色的刚性和透光性, 广泛应用于航空航天、玻璃装配业、汽车工业和电子电器等高附加值领域.

自20世纪以来, BPA-PC产能迅速增长, 已成为最广泛使用的塑料之一, 年产量约600万吨[1,2]. 然而, 其整体回收率不足10%, 导致显著的环境和健康风险[3,4]. 废弃BPA-PC化学稳定性高、降解缓慢, 长期残留于环

引用格式: 唐靖秋, 刘怡, 吕佳怡, 等. 双酚A型聚碳酸酯化学回收进展与趋势. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 1206–1221
Tang J Q, Liu Y, Lyu J Y, et al. Advances and trends in the chemical recycling of bisphenol-A polycarbonate (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 1206–1221, doi: 10.1360/SST-2025-0173

© 2026 《中国科学》杂志社

境中，并在光、热作用下逐渐释放BPA、4-羟基苯甲醛[5]、芳香醛[6]等恶性污染物. BPA作为一种内分泌干扰物，可通过竞争性结合雌激素受体扰乱人体内分泌功能，导致生殖异常、发育障碍及激素相关疾病，甚至在低暴露水平(0.2~20 ng/mL)下仍可升高肥胖、心血管疾病及精神健康风险. 因此, 开发高效回收技术不仅关乎资源循环，还是降低环境与健康风险的迫切需求[7,8].

当前BPA-PC废弃物的回收途径主要包括焚烧、物理回收与化学回收. 焚烧法虽可实现部分能量回收, 但资源化效率较低，且在高温条件下易释放二噁英和挥发性有机物等有毒污染物，存在显著的环境和健康风险. 物理回收工艺简单(破碎、清洗、干燥和熔融再造粒)、成本较低, 但在熔融再生过程中聚合物链发生热降解，导致材料性能显著下降，难以实现高值化回用. 相比之下, 化学回收从分子层面出发, 通过精准切断并重组特定化学键，将废弃塑料转化为基础化学品或高附加值中间体，兼具碳资源循环与白色污染治理潜力, 逐渐成为研究焦点.

近年来, 针对BPA-PC中BPA单元和碳酸酯结构的解聚与功能化已取得显著进展，实现了芳香烃、酚类化合物及轻质燃料等多种高值产物的定向合成(图1). 以往综述多侧重于聚酯回收的催化体系与反应策略, 如Gilbert等人[9]系统分析总结了各类PC化学回收方法的操作条件，并对产物收率、组成、选择性及反应时间等进行了对比, 详细阐述了相关反应机理. 然而, 现有对BPA-PC解聚过程中不同单元原位升级、产品与试剂结构关系研究仍较为缺乏，限制了该技术从实验室向产业端的推进.

在此背景下, 本综述立足于BPA-PC化学回收过程中的“原位增值”与“单元协同”策略，系统梳理了碳酸酯单元和BPA单元的解聚与升级路径，重点阐释两类结构单元在催化下的反应机制与协同效应，并总结其在高分子材料再合成中的最新应用. 同时，本文明确指出了当前技术在大规模推广中面临的关键挑战，旨在为绿色催化体系开发、过程强化与系统集成提供理论参考和技术支撑, 推动BPA-PC化学回收向高效、高值与工业化方向发展.

2　碳酸酯单元的原位升级

从结构和化学键特性来看, BPA-PC链中的碳酸酯

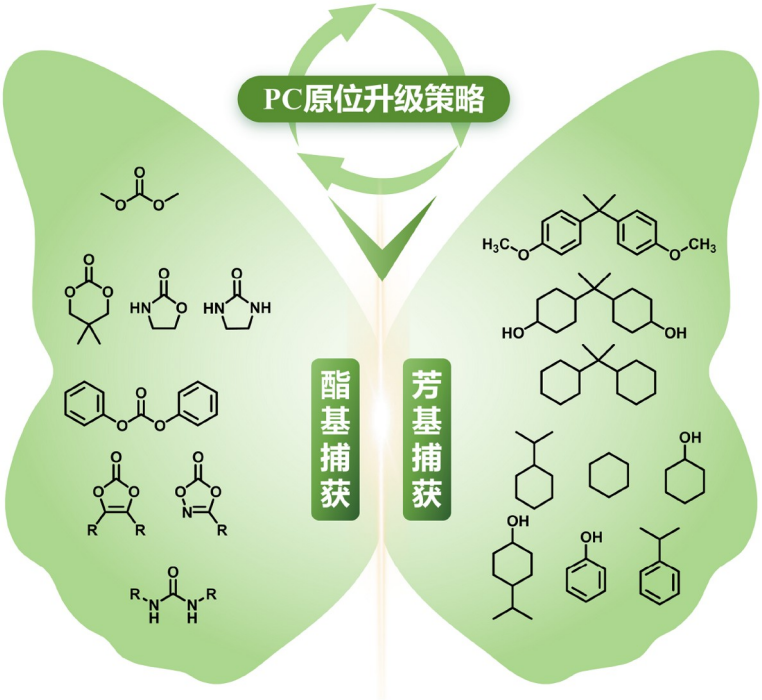


图 1　(网络版彩图) BPA-PC解聚过程中碳酸酯基团和BPA的原位升级转化

Figure 1　(Color online) In-situ upgrading of bisphenol A and carbonate units during BPA-PC depolymerization.

键(–O–(C=O)–O–)通常比BPA单元更易发生断裂与转化. 碳酸酯中的羰基碳因与两个强吸电子的氧原子相邻, 导致其电子密度显著降低, 呈现出明显的亲电性, 使其在亲核环境中易受到醇类、胺类或水等亲核试剂的攻击, 进而引发酯键的断裂. 此外, 碳酸酯结构空间位阻较小, 有利于亲核试剂靠近并作用于反应中心; BPA单元上的两个苯环, 构型刚性强、共轭效应显著, 且位阻较大, 相较于酯基反应活性更低. 基于此, 在多种解聚及转化体系中, 碳酸酯基团通常成为优先反应位点, 碳酸酯基团也通常被视为实现BPA-PC定向解构与官能化转化的重要反应靶点. 近年来, 研究者已开发出多种捕获试剂, 实现了碳酸酯单元的原位升级与定向转化. 本节将重点探讨碳酸酯单元在BPA-PC溶剂解过程中的原位升级最新进展.

2.1 一元捕获试剂

一元捕获试剂, 通常指在反应中一般仅表现出一个亲核反应位点的化学物质, 如水、甲醇、乙醇等. 这类试剂在与碳酸酯基团反应时, 能够通过其单一亲核位点对羰基碳发起进攻, 进而诱导酯键断裂, 实现对碳酸酯结构的高效捕获与转化. 由于其结构简单、反应选择性高、产物组成清晰, 一元捕获试剂在BPA-PC溶剂解及碳酸酯官能化过程中具有广泛应用前景, 也为后续产物的分离纯化和高值利用提供了便利. 这些一元捕获试剂在催化剂的催化下可进攻碳酸酯单元中电子密度较低的羰基碳, 形成不稳定的五配位四面体中间体. 该中间体随后发生协同断裂, 释放出芳氧基. 芳氧基在溶剂中迅速质子化, 生成稳定的酚羟基, 从而实现BPA的释放. 与此同时, 亲核试剂与羰基碳形成新的共价键(例如形成RO–C=O), 最终生成低BPA-PC链段或相应衍生物.

2.1.1 水解

水作为最常见的捕获试剂之一, 可通过BPA-PC水解转化为BPA, 同时伴随生成热力学高度稳定但附加值较低的副产物二氧化碳(CO_2). 水解法通常可以分为中性、酸性和碱性水解, 其分类取决于水反应过程中反应介质的pH. 由于BPA-PC在水中的溶解性较差, 在常压中性水溶液条件下难以实现高效的水解反应. 而蒸汽环境或高温高压水体系则可在一定程度上克服BPA-PC与水之间的相容性障碍, 显著加速水解解聚过程. 例如, 已有研究表明, BPA-PC可在300°C、7.9 MPa的过热水蒸气条件下发生高效降解, 生成BPA, 产率可达80%[10]. 尽管该类高温高压体系在实验室条件下展现出良好的水解效率, 但其对能量输入和设备耐压性能要求较高, 不仅增加了反应系统的构建与运行成本, 同时还带来了较大的安全管理压力, 从而限制了其在工业规模下的推广与应用. 酸性水解通常在较高浓度(12 mol/L)的硫酸溶液中进行, 碱性水解则主要在金属氢氧化物(如NaOH)溶液中进行. 酸性和碱性水解有效降低了反应发生所需温度、反应时间和压强, 避免中性水解中高温高压的苛刻反应条件, 但其过程中需要大量使用酸或碱, 这些酸或碱难以回收再利用, 衍生次生废水, 且易引发设备腐蚀和环境污染问题. 表1总结了近年来具有代表性的水解技术进展.

从当前研究进展来看, 尽管一些新型催化体系(如离子液体、复合催化剂等)已被证明能够有效降低BPA-PC水解反应的表观活化能, 使反应在较温和条件下得以进行, 但该过程还普遍需要在140°C~200°C的高温区间内才能实现较高转化率, 其本质上的高能耗特性依然显著增加了工业化运行成本(图2). 水解过程中伴随产生的CO_2由于其热力学稳定性高、反应活性低, 在反应体系中难以实现高效的原位捕获与转化, 导致其在多数研究中被忽视. 这不仅造成了潜在碳资源的浪费, 还增加了温室气体的排放负担, 不利于塑料回收过程的绿色化与可持续发展.

2.1.2 醇解和氨解

在BPA-PC的化学回收路径中, 醇解法因其温和的反应条件与较高的转化效率而成为研究热点. 相比水解反应, 醇类试剂(如甲醇)具有较低的极性和更强的亲核性, 能够在更低的温度下实现BPA-PC的高效解聚, 不仅可产出BPA单体, 同时还对碳酸酯单元进行定向捕获与转化, 生成相应的烷基碳酸酯, 如碳酸二甲酯(dimethyl carbonate, DMC)等. DMC作为一种多功能平台分子, 在多个领域具有广泛应用价值, 例如作为清洁燃料添加剂、锂离子电池电解质的重要组分以及BPA-PC合成的重要原料. 因此, 基于甲醇的BPA-PC醇解体系已成为当前研究最为深入的醇解路径之一. 通过引入具有酸碱协同作用的可调控催化体系(如离子液体、深共熔溶剂等), 以及设计金属配合物类多相催化剂, 甲醇解反应已能够在50°C~180°C的温和条件下

表 1　废旧BPA-PC水解研究进展

Table 1　Research progress on hydrolysis of waste polycarbonate

催化剂类型	催化剂	反应条件	BPA收率 (%)	文献
无机酸	H_2SO_4	150°C, 14 h	>90	[11]
无机碱	NaOH	160°C, 0.67 h	>90	[12]
	NaOH	160°C, 0.17 h	>99	[13]
	NaOH	135°C, 0.25 h	92	[14]
	Na_2CO_3, NH_3, $CO(NH_2)_2$	300°C, 3 h	61	[15]
	MgO, CaO	500°C, 8 h	91	[16]
	NaOH	160°C, 0.67 h	>90	[17]
离子液体	[BMIM][Ac]	140°C, 3 h	96	[18]
	[HDBU][LAc]	140°C, 3 h	97	[19]
有机盐	$La(O_3SCF_3)_3$	160°C, 4 h	92	[20]
复合	ZnO-NPs/NBu_4Cl	100°C, 7 h	100	[21]

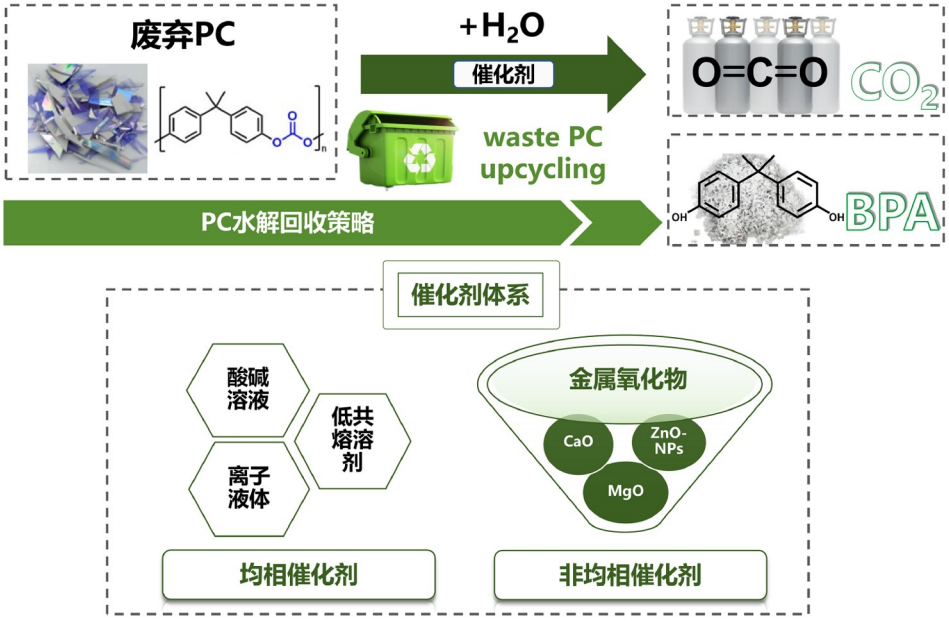


图 2　(网络版彩图) BPA-PC水解过程中不同催化剂促进双酚A和CO_2生成的研究

Figure 2　(Color online) Study on the promotion of BPA and CO_2 formation by different catalysts during BPA-PC hydrolysis.

实现对BPA-PC的高效、选择性转化. 相关研究进展汇总如表2所示. 其中, Krisbiantoro等人[22]以易规模化制备且成本低廉的偏铝酸钠为固体碱催化剂催化BPA-PC甲醇解, 使用四氢呋喃(tetrahydrofuran, THF)为溶剂, 在65°C下反应2 h, BPA的产率可达96.8%. Fehér等人[23]利用缩水甘油基功能化硅胶为载体, TBD (1,5,7-三氮杂双环[4.4.0]癸-5-烯)为活性组分, 制成TBD功能化硅胶(Si-TBD)并用于催化BPA-PC甲醇解, 研究者计算得出其活化能仅为44.19 kJ mol^{-1}, 是迄今为止该反应的最低活化能. 使用5 mol的Si-TBD基催化剂, 在65°C下反应2 h, BPA的产率可达96%, 其反应机理如图3所示. Kinbara等人[24]以一系列镧β-二酮配合物作为催化剂催化BPA-PC甲醇解, 在80°C下反应2 h, BPA和DMC的产率分别达到了87%和92%. Lee等人[25]

表 2 废旧BPA-PC甲醇解研究进展

Table 2 Research progress on methanolysis of waste polycarbonate

类型	催化剂	反应条件	BPA收率 (%)	文献
无机碱	NaOH	140°C, 3 h	91.4	[27]
	CaO-SBA-15	130°C, 3 h	94.9	[28]
	CeO_2-CaO-ZrO_2	100°C, 2 h	99.1	[29]
	Mg/Al-LDOs	110°C, 1 h	>98	[30]
	$NaAlO_2$	60°C, 2 h	96.8	[22]
有机碱/盐	DBU	70°C, 0.6 h	99	[31]
	TBD	50°C, 12 h	98	[32]
	季铵碱	100°C, 2 h	99.2	[33]
	四苯基氯化鏻	110°C, 2 h	90.1	[34]
	TBD:MSA	50°C, 12 h	>98	[35]
	Si-TBD	65°C, 2 h	96	[23]
离子液体	[BMIM][Ac]	90°C, 2.5 h	>95	[36]
	[HDBU][Suc]	70°C, 2 h	99	[37]
	[HDBU][LAc]	120°C, 1 h	99	[38]
	SBA-15-Pr-MIM-OH	120°C, 1 h	>98	[39]
深共熔溶剂	ChCl-2Urea	130°C, 2.5 h	>99	[40]
	[EMIMOH]Cl-2Urea	120°C, 2 h	98	[41]
金属有机物	Zn配合物	75°C, 1 h	95	[42]
	镧β-二酮配合物	80°C, 2 h	87	[24]
无催化剂	–	100°C, 6 h	99	[25]
	–	140°C, 6 h	91	[43]
无机酸	CO_2	140°C, 6 h	89	[44]

使用机械化学球磨技术促进了BPA-PC与甲醇之间的物理接触和能量传递, 在无溶剂或催化剂、100°C的条件下反应6 h, 实现了99%的BPA产率. 此外, 乙醇也可作为一元捕获试剂用于碳酸酯单元的原位升级. 例如, Seo等人[26]使用乙醇作为亲核试剂进攻BPA-PC, 以离子液体[EMIM][Ac]为催化剂, 在90°C的条件下反应10 h, 实现BPA-PC完全反应, BPA产率达到99%.

总体而言, 在BPA-PC醇解体系中, 尽管多功能离子液体等均相催化剂具有高催化活性, 但其制备繁琐、合成复杂, 还需昂贵原料, 且回收和纯化困难, 制备规模受限, 从而导致使用成本较传统催化剂高, 产业化应用受限. 多相催化剂(如复合金属氧化物、固载化离子液体)有利于分离和重复使用, 但其长期稳定性、抗中毒能力(尤其应对真实废料中的杂质)及循环使用性能仍需进一步提升. 新型催化材料(如MOFs、单原子催化剂)在BPA-PC醇解中的应用探索相对有限.

与一元醇类似, 一元氨/胺也可作为碳酸酯单元的捕获试剂[45]. Demarteau等人[46]采用4,4′-二氨基二苯基砜作为亲核胺源, 对BPA-PC中的碳酸酯单元进行选择性胺解反应, 成功合成了1,3-双[3-(1H-咪唑-1-乙基)丙基]脲类化合物. 尽管该方法的产率相对较低(约50%), 但其显著优势还在于利用BPA-PC作为碳酸酯源, 替代了传统合成过程中常用的剧毒试剂对苯二甲酰氯, 从而有效降低了环境污染和操作者的健康风险. Lee等人[47]提出了一种环境友好的胺诱导解聚策略, 在无溶剂、无催化剂条件下即可实现BPA-PC的高效降解. 研究表明, 不同类型的胺在100°C~150°C、N_2氛围下反应1~12 h, 将碳酸酯单元定向转化为脲类衍生物(产率21%~99%). 该方法不仅适用于消费后BPA-PC废弃物(如护目镜和光盘), 且由于无需催化剂, 还有效避免传

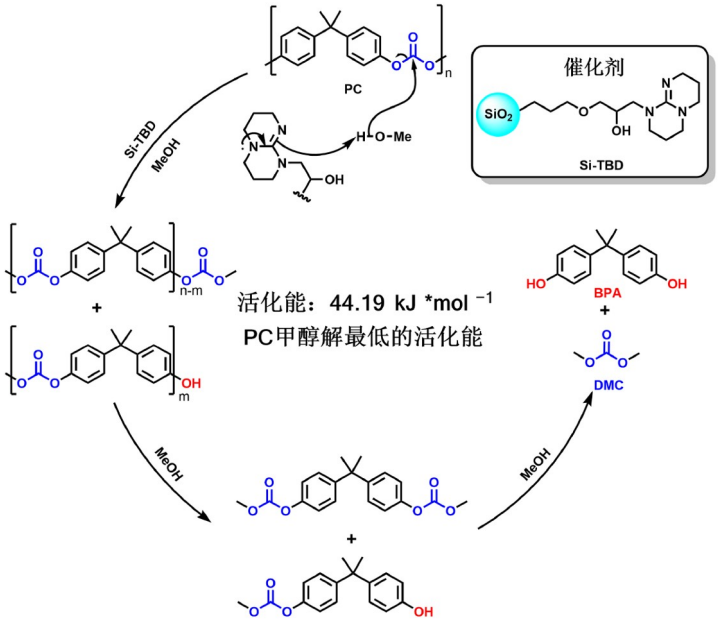


图 3　(网络版彩图) Si-TBD催化的BPA-PC甲醇解[23]

Figure 3　(Color online) Si-TBD-catalyzed methanolysis of BPA-PC [23].

统体系中因杂质或添加剂引起的催化剂失活问题，凸显了其工艺简便与环境友好优势.

目前，PC的氨/胺解反应虽已取得一定进展，但距离规模化应用仍存在显著差距. 首先, 反应生成的含氮化学品与BPA分离纯化难度大，成为制约工艺放大的关键障碍. 其次，不同胺类的反应活性和选择性差异较大，导致产率普遍仅在50%~80%，难以满足工业化对高效利用的要求. 未来需在高效催化剂设计与绿色分离工艺方面持续探索，以提升反应选择性与产率，优化分离效率与资源利用率，以推动该技术迈向实际工业应用.

2.2　二元捕获试剂

相较于仅能引发分子间链式反应的单醇类捕获试剂, 具有双亲核位点的二元捕获试剂(如二元醇或二元胺)在碳链结构适宜的条件下, 可通过分子内协同作用实现高效的环化转化. 具体而言, 二元捕获试剂一侧亲核位点首先进攻BPA-PC中的碳酸酯基团, 生成中间体后, 另一亲核位点可进一步发生分子内亲核攻击, 最终通过闭环反应形成五元或六元环状碳酸酯结构. 该环化过程具有明显的内驱力, 因五/六元环结构在热力学上更为稳定、环张力较小，从而提升了产物的选择性与反应效率. 这一策略实现了二元捕获试剂对碳酸酯单元的原位环化增值转化, 利用BPA-PC骨架中的羰基作为碳源，替代传统合成环状碳酸酯所需的剧毒试剂(如光气或一氧化碳)，有效规避了潜在的环境与安全风险. 该方法将废弃BPA-PC资源化利用与高附加值环状碳酸酯的绿色合成相结合，展现出良好的可持续性与工业化潜力.

乙二醇作为典型的二元捕获试剂，分子中含有两个羟基亲核位点，可同时参与多步亲核反应，是实现BPA-PC碳酸酯单元环化转化的代表性试剂之一. 例如，Wang等人[48]以乙二醇为捕获试剂，在25°C反应40 h, 生成碳酸乙烯酯(产率为98%). Edge等人[49]报道了一种基于流动糖酵解工艺的BPA-PC乙二醇解策略, 以DMF为溶剂，并引入可循环的DMAP-PS有机催化剂, 在温和条件下实现了>99%的BPA收率. 该研究首次在连续流动条件下利用有机碱催化剂实现了BPA-PC的高效解聚, 为聚碳酸酯的绿色回收提供了新的思路.

与二元醇相似, 二胺捕获试剂可耦合BPA-PC解聚定向制备BPA和五元/六元环状脲类化合物. 例如, Wang等人[48]以乙二胺为捕获试剂，$Zn[N(SiMe_3)_2]_2$为催化剂, 在25°C下反应2.5 h, BPA产率为94%, 2-咪唑烷酮的产率为98%. 近年来, 二元胺解的研究方向不仅

局限于合成酰胺化学品，还通过设计并使用具有再聚合功能的胺类捕获剂，合成含氮聚合物前体. Quaranta等人[50]早期研究通过二胺解反应将BPA-PC解聚为BPA和低聚氨基甲酸酯中间体，并进一步生成非异氰酸酯聚脲. 并在此基础上进一步提出一种串联反应策略：首先利用六亚甲基二胺在常温至100°C的条件下解聚BPA-PC，生成低聚氨基甲酸酯中间体[51]；随后在无需额外催化剂的条件下进行甲醇解，将中间体转化为二甲基氨基甲酸酯. 该策略不仅将BPA的回收效率提升至>90%，还将二甲基氨基甲酸酯的产率提高至72%. 该合成方法通过规避传统合成方法中剧毒光气及高危异氰酸酯类前驱体的使用，显著消减了毒害性暴露风险. 除传统的二元醇和二元胺类捕获试剂外，近年来，一些具有新型结构的捕获试剂(手性分子、羟肟酸和α-羟基酮)也被陆续开发. 例如，氨基醇类化合物是一类同时含有氮和氧杂原子的高效双亲核捕获试剂. 氨基醇耦合BPA-PC解聚可制备噁唑烷酮类化合物，该类含氮杂环作为医药中间体广泛应用于抗生素、抗抑郁及抗肿瘤药物合成[52,53]. 通过使用不同取代基的手性胺基醇，研究成功合成了多种高附加值的手性2-噁唑烷酮. Zhou等人[54]研究了一种无催化剂的氨基醇解聚方法，使用强亲核性的乙醇胺作为解聚试剂，并在高极性溶剂(如DMSO)的溶剂化效应下，在温和条件(120°C)下仅需5 h即可实现BPA-PC的完全转化，生成BPA和噁唑烷酮，产率均超过99%. Jung等人[55]开发了一种以羟肟酸为捕获试剂的碳酸酯单元原位增值转化策略，实现了BPA-PC向高附加值1,4,2-二氧唑-5-酮化合物的高效转化. 该反应在温和条件下(30°C、4 h)使用TBD作为有机催化碱，产率高达91%. 此外，Onida等人[1]发现α-羟基酮类化合物(如安息香)是一类高效的碳酸酯单元捕获试剂. 得益于催化剂TBD通过氢键同时活化安息香的羟基和BPA-PC的羰基，该反应在25°C、绿色溶剂2-MeTHF中进行16 h，能够高效转化废弃BPA-PC，生成乙烯基碳酸酯，产率高达84%.

综上所述，醇解和胺解作为BPA-PC化学回收的重要路径，已在催化体系开发和反应条件优化方面取得了显著进展，能够高效回收BPA并定向生成碳酸酯、氨基甲酸酯等高附加值产物. 然而，当前研究仍存在亟待解决的关键挑战：首先，大多数高效催化体系(特别是离子液体和有机碱)的可回收性及长期稳定性尚未得到充分验证，其工业化经济可行性存疑；其次，胺/氨解的整体技术成熟度仍低于醇解，尚缺乏可支撑大规模应用的工艺方案；最后，现有研究多在纯BPA-PC体系中进行，其对实际废弃物中常见杂质和混合塑料组分的耐受性与适应性仍是未知数.

因此，未来研究应超越对单一催化剂活性的追求，转而聚焦于: (1) 开发稳定、可循环且易于分离的多相催化系统; (2) 探索这些体系在复杂真实废料场景下的应用潜力. 唯有攻克这些技术瓶颈，醇解和氨解技术才能真正从实验室走向工业化应用.

3 BPA单元的原位升级

传统溶剂解策略主要聚焦于碳酸酯单元的转化，但由于BPA分子中苯环结构较为稳定，其在反应体系中难以实现选择性活化与转化. 为突破这一瓶颈，热解与氢解工艺逐步发展出以断裂C–C和C–O键为核心的BPA原位转化路径，实现BPA化学键的有效切断与结构重构，拓展了其高值化利用的可能性. 通过高效断裂BPA中的C–O和C–C键，这些工艺可实现BPA-PC中BPA单元的原位转化，生成多种芳香类和烷烃类高附加值化学品，已成为当前芳基单元升级利用的主流技术路线. 近年来热解与氢解技术的研究进展已在表3中总结.

热解是BPA-PC分子链在惰性气氛及高温条件下(>400°C)发生均裂，通过随机断链、解聚或端链断裂、交联和聚合物链断裂等机制被分解成为汽油、煤油和柴油等轻质燃料. 热解技术可普适性处理混合型、未清洗及未分类的BPA-PC废弃物，能有效抑制有毒气态产物(如二噁英)的生成. Pal等人[56]利用铝工业废料赤泥(red mud, RM)作为催化剂，在550°C热解条件下使BPA-PC转化为酚类化合物，产率达46.6%.

氢解是指在氢气氛围(2~5 MPa)、中温条件(200°C~300°C)及贵金属催化剂的催化下，活化氢攻击BPA-PC含氧基团，诱发分子重构和氢化，最终生成环己烷衍生物[57]. 与热解相比，催化氢解在较温和的条件下进行，能耗较低且产物选择性高，有助于提升回收产物的质量. 近年来，研究者们在催化剂开发、反应机理研究及工艺优化等方面取得了显著进展，为BPA-PC的高效转化和资源化利用提供了理论和技术支持. Luo等人[58]开发Pd/C和三氟甲磺酸镧($La(OTf)_3$)

表 3　废旧BPA-PC热解和氢解的研究进展

Table 3　Research progress on pyrolysis and hydrogenolysis of waste polycarbonate

反应类型	催化剂	反应条件	主要产物	收率 (%)	文献
热解	RM	N_2氛围, 550°C	酚类化合物	46.6	[56]
	MgO	N_2氛围, 600°C	酚类化合物	–	[65]
	Ni/SiO_2	CO_2氛围, 600°C	酚类化合物	–	[66]
	NaOH	N_2氛围, 600°C	苯酚; IPP	35.3; 29.9	[67]
	MgO	CO_2氛围, 600°C	BPA	23.5	[68]
氢解	Rh/C+H-USY	H_2氛围, 200°C, 12 h	丙烷-2,2-二异丙基二环己烷	75	[69]
	NiCo/C	H_2氛围, 550°C, 45 min	环烷烃	100	[70]
	Ni/HZSM-5	H_2氛围, 190°C, 2 h	环烷烃	99.3	[60]
	Ru-Ni/H-Beta	H_2氛围, 150°C, 1 h	丙烷-2,2-二异氰酸酯环己烷	97.3	[59]
	MoCo/NiC	H_2氛围, 500°C, 40 min	环烷烃	84.5	[71]
	Manganese	H_2氛围, 120°C, 1 h	4-(3,3-二甲基-1-丙烯基)苯酚	85	[72]
	$La(OTf)_3$	H_2氛围, 140°C, 12 h	C15双环烷烃	95	[58]
	Ru-Ni/H-Beta	H_2氛围, 148°C, 10 h	C15环烷烃	90.2	[59]
	Ni/HZSM-5	H_2氛围, 250°C, 6 h	环烷烃	99	[60]

组成的双功能催化剂体系, Pd/C作为加氢催化剂, 能够有效促进苯环的加氢反应, 而$La(OTf)_3$作为均相酸催化剂, 能够高效诱导C–O键的断裂. 在140°C和6 MPa H_2条件下, 以乙酸为溶剂, BPA-PC可高效转化为C15双环烷烃, 产率达95%. 反应后, Pd/C可通过过滤回收, 而产物与溶剂及$La(OTf)_3$因极性差异自然分层: 上层为非极性产物, 下层为乙酸和$La(OTf)_3$, 可直接循环使用. 研究表明, Pd/C在三次循环中保持稳定, 而乙酸和$La(OTf)_3$可重复使用八次且活性无明显下降, 显著提高了工艺的经济性和可持续性. Manal等人[59]开发了一种单催化系统(Ru-Ni/H-Beta), 相较于传统的双催化系统更易于回收和循环利用. 该催化剂通过一锅浸渍法制备, 在温和条件下实现了BPA-PC废弃物选择性合成喷气燃料的成分C15环烷烃. Liu等人[60]开发的双功能Ni/HZSM-5催化剂可在190°C、4 MPa H_2的温和条件下将BPA-PC氢解为环烷烃(总产率99.3%), 其中C15双环烷烃的产率为81.2%. 随后深入研究了BPA-PC的HDO反应路径, BPA-PC加氢脱氧反应路径主要包括解聚和加氢脱氧两个阶段. 在解聚阶段, BPA-PC通过苯环邻位的碳氧键氢解生成C15芳烃和C15单酚, 这一过程主要依赖于镍位点的加氢活性. 在加氢脱氧阶段, C15芳烃在镍位点上加氢转化为C15环烷烃, 而C15单酚则通过金属-酸双位点的协同作用进行加氢脱氧, 最终生成C15双环烷烃. 2024年, 该团队为解决混合塑料废弃物的成分复杂、分类和清洁成本高的问题, 提出了一种一锅式HDO方法, 利用经济高效的Ni/HZSM-5双功能催化剂, 在温和条件下将含有聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)、BPA-PC和聚苯醚(poly phenylene oxide, PPO)的混合塑料废弃物高效转化为可循环的环烷烃[61]. 在250°C和4 MPa H_2条件下, 4~6 h内环烷烃的产率高达99%.

尽管氢解技术在废弃BPA-PC的资源化利用中展现出显著优势, 如生产替代燃料和储氢材料等, 但其广泛应用还面临一些实际挑战. 首先, 氢解过程通常需要较高的氢气压力和温度, 导致能耗和成本较高, 限制了其规模化应用. 其次, 催化剂的活性和稳定性仍需进一步提升. 此外, 氢解产物的选择性调控仍具挑战性, 如何高效分离和纯化目标化学品也是亟待解决的问题. 因此, 未来研究需聚焦于开发高效稳定的催化剂、优化反应条件以及探索低能耗工艺, 以推动氢解技术的实际应用和产业化发展.

上述热解与氢解技术在一定程度上实现了BPA单元的深度转化, 但在此过程中, 这类高能过程易导致BPA分子骨架中C–C键断裂, 丧失了BPA的闭环循环价值及其本征结构的应用潜力. 为应对这一挑战, 一种具有前景的策略是: 在溶剂解过程中引入针对BPA

官能团特性设计的保护试剂，保留分子中关键的C–C骨架结构，通过官能团转化实现BPA单元的原位高值化升级. 例如，Alberti等人[62]首次采用乙酸/乙酸酐作为BPA酚羟基的捕获试剂，在4-二甲氨基吡啶催化下将BPA-PC高效转化为双酚A二乙酸产物. 此外，反应过程中释放的CO_2可被3-二甲基氨基丙胺有效转化为氨基酸类化学品, 提升了碳资源利用效率, 其产物双酚A二乙酸酯与碳酸二苯酯亦可直接用作再生BPA-PC的合成原料, 为实现BPA-PC的闭环循环提供了可行路径. 此外, Moyilla等人[63]开发了一种Cu/Fe协同催化的PC解聚-偶联新策略，实现了废弃BPA-PC通过一锅法高效转化为二芳醚和二芳二醚等高附加值产物. 该反应在DMSO为溶剂的条件下，以K_2CO_3为碱解剂促进BPA-PC断裂生成二苯酚钾，继而在Cu/Fe协同催化作用下与芳基卤代物发生交叉偶联，成功合成了一系列双酚A衍生芳基醚化合物. 最近，Zhang等人[64]提出了由DMC介导的原位醚化新策略，利用离子液体作为催化剂，以低毒、环境友好的DMC为甲基源，并引入N-甲基吡咯烷酮(N-methylpyrrolidone，NMP)作为溶剂，在相对温和的反应条件下(150°C、6 h)将废弃BPA-PC定向地转化为与BPA结构相似，但药用价值更高的双酚A二甲醚(BPA methyl ether，BPAME)，实现了BPA-PC的100%解聚，BPAME的产率为99%，具体反应过程如图4所示. 这些新兴策略突破了传统芳基捕获手段需在高温惰性气氛下进行、产物选择性低等技术瓶颈，展示了在温和条件下实现BPA碳骨架保留与功能性升级的可行性, 为构建高效、可循环的BPA-PC化学回收体系提供了新的方向.

4 废旧BPA-PC升级回收制备高分子材料

目前, 利用BPA-PC溶剂解制备结构可控单体的研究已趋成熟. 然而，废旧BPA-PC中普遍存在的添加剂(如增塑剂、抗氧化剂、着色剂、阻燃剂及封端剂)常会引入杂质, 导致解聚产物纯度下降, 进而限制其在高性能材料再合成中的应用. 为此, 近年来研究者逐步转向探索“非纯化再聚合”策略，即直接利用解聚产物进行聚合反应，以省略传统的分离与纯化步骤，简化工艺流程并提高资源利用效率.

Jones等人[73]首次发现BPA-PC大分子可作为缩聚反应的单体来源，在碳酸盐与芳基氟化物的存在下, BPA-PC可生成酚氧基中间体, 进而一步原位转化为合成聚芳醚砜(polyether sulphones, PSUs). Lei等人[74]利用BPA-PC解聚产物BPA为链扩展剂，结合其他链扩展剂, 以制备新型含酚氨基甲酸酯衍生物, 且该衍生物随后被用于合成PU, 实现了100%的原子经济效率. 随后, Wu等人[75]进一步拓展该策略，在80°C无催化条件下, 将聚BPA-PC与线性二胺进行胺解反应, 并在同一釜内

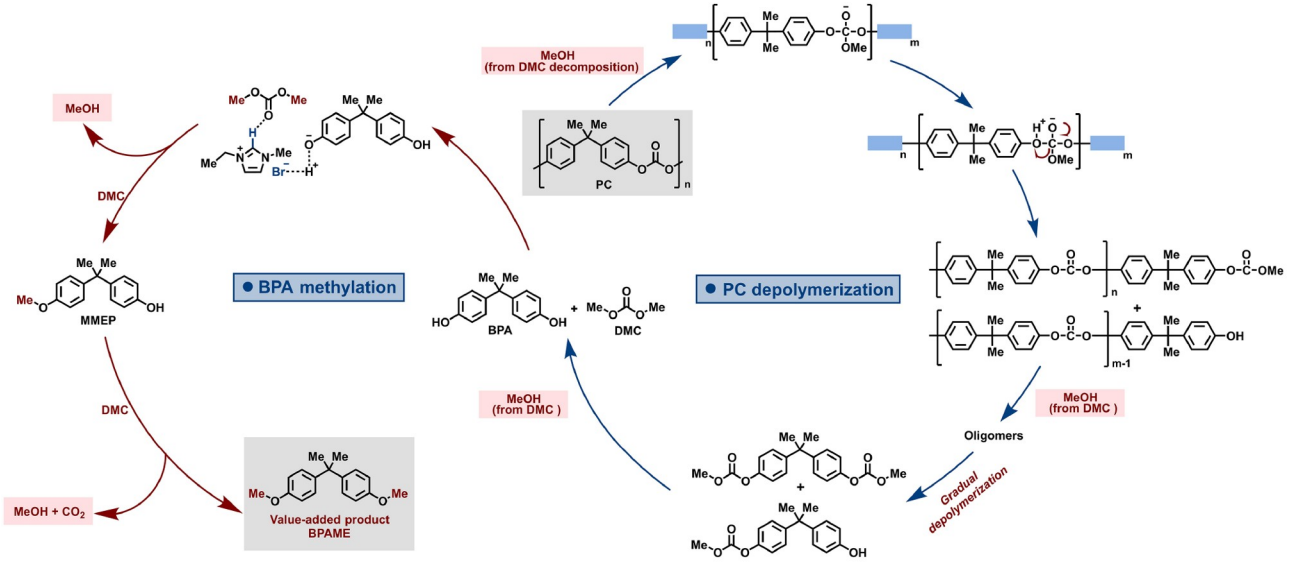


图 4 (网络版彩图) [Emim][Br]催化BPA-PC转化为BPAME反应路径[64]

Figure 4 (Color online) Possible reaction pathway for the conversion of BPA-PC to BPAME catalyzed by [Emim][Br] [64].

直接与二异氰酸酯进行缩聚生成PU. 但由于反应过程中BPA单元内异丙基桥的位阻效应及其化学结构的异质性, 导致所得PU材料的拉伸强度明显低于以丁二醇为原料的传统合成体系. 后续Huang等人[76]用醚代二胺替代线性二胺作为胺类试剂将BPA-PC转化为热塑性弹性聚氨酯(thermoplastic polyurethanes, TPUs), 改善了合成的TPUs拉伸强度. Jiang等人[77]利用BPA-PC回收的BPA制备了两种苯乙酸酯封端的寡酯并成功用作环氧树脂的固化剂. 最近, Li等人[78]报道一种协同回收BPA-PC和PET的高效策略. 在金属离子液体催化剂[TBDH]Ac作用下, BPA-PC与PET同时进行甲醇解反应, 所得回收单体无需额外纯化, 便可直接用于后续聚合. 结合两阶段界面聚合技术及温度可控工艺, 该方法实现了将混合塑料废弃物高效转化为高性能聚芳酯材料, 为通用塑料的绿色回收利用提供了新思路. 与传统BPA-PC回收方法需额外纯化单体后再聚合的路线相比, 上述“解聚-转化-聚合”一体化策略不仅显著降低了对原料纯度的依赖, 还最大程度减缓了杂质对聚合反应的干扰, 具备良好的可扩展性与工业化潜力. 这一路径有望推动废弃BPA-PC向高性能工程塑料的规模化再生利用, 为构建资源闭环与绿色制造体系提供技术支撑.

5　BPA-PC回收产业化进展

目前, BPA-PC的产业化回收仍以物理方法为主. 以科思创为例, 该公司于2020年1月与农夫山泉和奥塞尔签订了19 L聚碳酸酯水桶回收协议, 年回收量达100万只; 同时在上海启动建设首条物理回收生产线, 预计自2026年起可为亚太地区提供超过6万吨/年含再生成分的聚碳酸酯. 相比之下, 化学回收仍主要停留在实验室和中试阶段. 例如, 三菱化学集团在福冈工厂建立了中试研究平台, 并计划在2030年前实现约1万吨/年的处理能力. 其核心策略是通过化学解聚将BPA-PC还原为单体, 再经聚合制备高品质再生BPA-PC, 从而突破机械回收中因性能衰减和混料杂质而导致的品质不足瓶颈. 同时, 该公司强调构建涵盖整个产业链的回收体系, 并将化学回收与高附加值特种BPA-PC(如XANTAR^{TM})业务结合, 以推动循环经济与高性能材料开发的协同. 相比之下, 科思创开发了专为BPA-PC设计的化学分解工艺, 可高效处理含BPA-PC比例超过50%的混合废塑料, 并能直接回收BPA-PC前体单体, 无需进一步纯化即可再合成新BPA-PC, 从而确保其在汽车、消费电子等高端应用中的性能要求. 该工艺已在实验室得到验证, 并正在德国勒沃库森建设中试工厂, 以推动连续化和规模化运行. 同时, 科思创也在探索酶促分解和智能热解等新型回收路径. 总体而言, 尽管化学回收技术具有显著潜力, 但还缺乏成熟的工业化示范和应用, 未来仍需在催化体系稳定性、经济性及循环利用效率方面取得进一步突破.

6　挑战与展望

BPA-PC的化学回收通过高选择性解聚与组成单元的原位高值化转化, 在治理废塑料污染和推动资源循环利用方面展现出巨大潜力. 目前, 多种回收路径在实验室层面取得了显著进展, 成功合成了如DMC、环状碳酸酯及功能化芳香烃等高附加值化合物. 通过使用捕获试剂与废弃BPA-PC中碳酸酯单元进行原位耦合, 不仅可高效回收BPA单体, 还可依据捕获试剂结构的差异, 定向合成多种碳酸酯及其衍生物, 实现碳酸酯结构单元的原位增值转化. 而在BPA结构单元的利用方面, 热解与催化氢解等高能过程可实现对惰性C–O及C–C键的选择性断裂与重构, 推动芳香环单体的深度解构与高值利用.

尽管该领域发展迅速, 还面临多项关键挑战, 亟需从基础研究和工程技术层面同步突破.

(1) 从CO_2“减排”到“增值”的范式转变. 现有PC降解体系缺乏具备CO_2捕获能力与转化活性(CO_2活化能高、选择性差)的催化体系, 以及传统工艺中CO_2捕获与转化步骤的分离导致的高能耗与复杂流程, 使得CO_2往往被忽略或直接排放而未得到有效利用. 尽管已有研究尝试通过氢解体系将部分CO_2原位转化为CH_4或CH_3OH, 但整体利用效率低, 还缺乏系统性的原位增值转化策略. 值得注意的是, 将BPA-PC水解及热解过程中释放的CO_2视为待处理的副产物而非资源, 是当前研究的重大局限. 实际上, BPA-PC链中的碳酸酯单元(–O–(C=O)–O–)可被视为一种“被包裹的C1合成子”[79], 是一种无需额外能耗捕集、已处于活化状态的理想CO_2源. 与从气态CO_2(需克服极高活化能垒)出发的传统转化路径相比, 直接利用此原位释放、局域浓度高的活性碳源, 在热力学和原子经济性上具有显

著优势. 其转化模式比碳酸盐单元更具优势和吸引力[80]. 这一被低估的特殊机遇, 呼吁研究范式从“CO_2减排”转向“CO_2增值”. 未来的突破性研究应致力于开发与解聚反应耦合的原位捕获-转化串联催化体系. 例如, 设计多功能催化剂, 在促使BPA-PC解聚的同时, 能立即将生成的CO_2与反应体系中共存的环氧化物(如环氧丙烷)进行环加成反应, 在同一反应器内直接合成高附加值的环状碳酸酯(如碳酸丙烯酯). 该策略不仅可实现对废弃BPA-PC中碳资源的100%原子利用, 完美规避CO_2的分离与排放步骤, 还能将塑料升级为广泛应用于锂电池电解液和绿色溶剂的重要化学品[81], 为构建“废塑料精炼”的闭环碳经济提供颠覆性路径.

(2) 复杂实际塑料体系的适应性不足. 实验室研究普遍使用高纯度BPA-PC样品进行反应验证, 然而现实中废弃BPA-PC多以混合塑料、含杂质塑料等形式存在, 常伴随有机污染物、生物质杂质或无机填料, 难以直接适配现有溶剂解体系. 这些杂质不仅稀释了反应体系, 还会深刻影响解聚过程: 有机添加剂可竞争性吸附于催化活性位点, 导致催化剂中毒失活; 而无机填料则会改变反应介质的传质效率、局部极性与黏度, 引起反应路径紊乱和选择性下降. 因此, 该领域的核心局限性并非仅在于解聚本身, 而在于现有催化系统对真实废弃物的耐受性不足. 目前针对多组分混合塑料体系的解聚方法及其反应机制仍缺乏系统性的研究与深入探索. 未来研究的突破点不应局限于优化本征催化活性, 更需转向设计能抗中毒、适应复杂组分变化的耐受性催化材料, 或开发高效的预处理-协同解聚集成工艺, 以实现对实际混合塑料废料的高选择性、高稳定性转化.

(3) 绿色低碳工业化回收体系尚待完善. BPA-PC化学回收走向工业化应用不仅面临技术性能挑战, 还需系统评估其经济性与环境可承受性. 许多实验室中表现出色的催化系统(如离子液体、贵金属催化剂)仍面临成本高昂、回收困难以及依赖有毒有机溶剂(如NMP, THF)等问题, 是其工业化的核心瓶颈. 因此, 开发廉价高效的催化剂体系如结构化固体酸/碱、磁分离催化剂等, 以替代贵金属和难回收的均相催化剂; 着力设计与解聚-产物分离-纯化过程高度一体化的连续流工艺, 通过过程强化减少能耗、避免中间分离步骤, 是推动BPA-PC化学回收工业化的关键. 基于生命周期评估(life cycle assessment, LCA)研究, 通过废塑料回收制备的再生BPA-PC在环境影响强度上显著优于传统石油基原生BPA-PC生产. 数据显示, 再生BPA-PC在主要环境影响指标(如全球变暖潜势、化石资源消耗)中可实现82.3%~99.6%的环境效益提升. 具体而言, 每吨BPA-PC的生产可减少约4.5 t CO_2的全球变暖潜势, 并降低1.45 t石油当量的化石资源消耗, 凸显其在碳减排与资源循环利用中的系统优势[81].

(4) 多学科交叉探索仍需深化. 尽管化学回收技术取得了显著进展, 多学科交叉的优势还未充分体现. 未来通过化学与催化科学优化底物活化和反应机理, 材料科学改善催化剂载体和界面传质, 微生物学与酶工程筛选和改造高效降解酶, 反应工程与过程设计实现连续流反应与一体化产物分离, 可以在提升效率、降低能耗和推动工业化应用方面发挥协同作用. 这种多学科交叉的整合, 为生物催化尤其是酶解技术的应用提供了广阔空间. 生物催化降解, 特别是酶解技术, 因其反应条件温和、环境友好且具有高选择性, 正成为BPA-PC可持续回收领域的前沿方向.

近期研究揭示了BPA-PC酶解的巨大潜力: 从发现Pseudoxanthomonas sp. NyZ600等微生物通过外切机制降解BPA-PC并释放BPA单体[82], 到通过转录组学成功鉴定出首个可在温和水相条件下高效解聚BPA-PC的金属磷酸酯酶BsMPPE[83], 标志着BPA-PC降解酶的研究从微生物筛选进入了酶分子发掘与机制解析的新阶段. 尤为值得注意的是, 通过表面工程策略构建的Pickering乳液biocatalysis体系[84], 巧妙解决了BPA-PC底物疏水性与酶催化水相环境之间的传质壁垒, 大幅提升了降解效率, 为难以降解塑料的生物处理提供了崭新的思路. 通过多学科交叉融合, BPA-PC的酶解技术有望为塑料循环经济提供一条绿色、精准且经济可行的路径.

参考文献

1 Onida K, Fayad M, Norsic S, et al. Chemical upcycling of poly(bisphenol A carbonate) to vinylene carbonates through organocatalysis. Green Chem, 2023, 25: 4282–4291

2 Yang R, Xu G, Lv C, et al. Zn(HMDS)$_2$ as a versatile transesterification catalyst for polyesters synthesis and degradation toward a circular materials economy approach. ACS Sustain Chem Eng, 2020, 8: 18347–18353

3 Geyer R, Jambeck J R, Law K L. Production, use, and fate of all plastics ever made. Sci Adv, 2017, 3: e1700782

4 Thiounn T, Smith R C. Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste. J Polym Sci, 2020, 58: 1347–1364

5 Ighalo J O, Kurniawan S B, Khongthaw B, et al. Bisphenol A (BPA) toxicity assessment and insights into current remediation strategies. RSC Adv, 2024, 14: 35128–35162

6 Ahamad T, Naushad M, Alzaharani Y, et al. Photocatalytic degradation of bisphenol-A with g-C_3N_4/MoS_2-PANI nanocomposite: Kinetics, main active species, intermediates and pathways. J Mol Liquids, 2020, 311: 113339

7 Peng L, Fu D, Qi H, et al. Micro- and nano-plastics in marine environment: Source, distribution and threats—A review. Sci Total Environ, 2020, 698: 134254

8 Moriyama K, Tagami T, Akamizu T, et al. Thyroid hormone action is disrupted by bisphenol A as an antagonist. J Clin Endocrinol Metab, 2002, 87: 5185–5190

9 Gilbert E A, Polo M L, Maffi J M, et al. The organic chemistry behind the recycling of poly(bisphenol-A carbonate) for the preparation of chemical precursors: A review. J Polym Sci, 2022, 60: 3284–3317

10 Grause G, Kärrbrant R, Kameda T, et al. Steam hydrolysis of poly(bisphenol A carbonate) in a fluidized bed reactor. Ind Eng Chem Res, 2014, 53: 4215–4223

11 Abedsoltan H. Concentrated sulfuric acid as a catalyst for chemical recycling of polycarbonate in water. Waste Biomass Valor, 2024, 15: 2793–2806

12 Tsintzou G P, Antonakou E V, Achilias D S. Environmentally friendly chemical recycling of poly(bisphenol-A carbonate) through phase transfer-catalysed alkaline hydrolysis under microwave irradiation. J Hazard Mater, 2012, 241-242: 137–145

13 Rosi L, Bartoli M, Undri A, et al. Synthesis of dianols or BPA through catalytic hydrolyisis/glycolysis of waste polycarbonates using a microwave heating. J Mol Catal A-Chem, 2015, 408: 278–286

14 Jain A, Connon S J. Catalytic alkaline hydrolysis of PET and BPA-PC waste in minutes at atmospheric pressure without microwaves or organic solvents. Green Chem, 2025, 27: 4986–4994

15 Béri J, Hegyi M, Tóth B, et al. Semi-continuous hydrothermal waste valorization: Facile protocol for monomer recovery from poly(bisphenol A carbonate). J SuperCrit Fluids, 2025, 223: 106610

16 Grause G, Tsukada N, Hall W J, et al. High-value products from the catalytic hydrolysis of polycarbonate waste. Polym J, 2010, 42: 438–442

17 Tsintzou G P, Achilias D S. Chemical recycling of polycarbonate based wastes using alkaline hydrolysis under microwave irradiation. Waste Biomass Valor, 2013, 4: 3–7

18 Song X, Liu F, Li L, et al. Hydrolysis of polycarbonate catalyzed by ionic liquid [Bmim][Ac]. J Hazard Mater, 2013, 244-245: 204–208

19 Liu M, Guo J, Gu Y, et al. Degradation of waste polycarbonate via hydrolytic strategy to recover monomer (bisphenol A) catalyzed by DBU-based ionic liquids under metal- and solvent-free conditions. Polym Degradation Stability, 2018, 157: 9–14

20 Quaranta E. Rare Earth metal triflates M(O_3SCF_3)$_3$ (M = Sc, Yb, La) as Lewis acid catalysts of depolymerization of poly-(bisphenol A carbonate) via hydrolytic cleavage of carbonate moiety: Catalytic activity of La(O_3SCF_3)$_3$. Appl Catal B-Environ, 2017, 206: 233–241

21 Iannone F, Casiello M, Monopoli A, et al. Ionic liquids/ZnO nanoparticles as recyclable catalyst for polycarbonate depolymerization. J Mol Catal A-Chem, 2017, 426: 107–116

22 Krisbiantoro P A, Sato M, Lin T M, et al. Low-temperature methanolysis of polycarbonate over solid base sodium aluminate. Langmuir, 2024, 40: 5338–5347

23 Fehér Z, Németh R, Kiss J, et al. A silica-supported organocatalyst for polycarbonate methanolysis under mild and economic conditions. Chem Eng J, 2024, 485: 149832

24 Kinbara Y, Ishitani H, Kobayashi S. Efficient low-temperature depolymerization of polycarbonate catalyzed by lanthanum β-diketonate complexes. Green Chem, 2025, 27: 7544–7550

25 Lee H W, Yoo K, Borchardt L, et al. Chemical recycling of polycarbonate and polyester without solvent and catalyst: Mechanochemical methanolysis. Green Chem, 2024, 26: 2087–2093

26 Seo S, Lee S H, Lee J, et al. Polycarbonate ethanolysis with imidazolium-based ionic liquids: Recovery of high-purity BPA and value-added by-product. Mater Today Sustainability, 2024, 25: 100665

27 Hu N, Su L, Li H, et al. Degradation of polycarbonate waste to recover bisphenol A and dimethyl carbonate using urea as a cheap green catalyst. Green Chem, 2024, 26: 9378–9387
28 Qingdao University of Science and Technology. Method for recovering bisphenol A from polycarbonate materials by methanol alcoholysis catalyzed by CaO-SBA-15 molecular sieve (in Chinese). China patent, CN201611093341.3, 2019 [青岛科技大学. CaO-SBA-15分子筛催化聚碳酸酯材料甲醇醇解回收双酚A的方法. 中国专利, CN201611093341.3, 2019]
29 Liu F, Xiao Y, Sun X, et al. Synergistic catalysis over hollow CeO_2-CaO-ZrO_2 nanostructure for polycarbonate methanolysis with methanol. Chem Eng J, 2019, 369: 205–214
30 Huang W, Wang H, Zhu X, et al. Highly efficient application of Mg/Al layered double oxides catalysts in the methanolysis of polycarbonate. Appl Clay Sci, 2021, 202: 105986
31 Quaranta E, Sgherza D, Tartaro G. Depolymerization of poly(bisphenol A carbonate) under mild conditions by solvent-free alcoholysis catalyzed by 1,8-diazabicyclo[5.4.0]undec-7-ene as a recyclable organocatalyst: A route to chemical recycling of waste polycarbonate. Green Chem, 2017, 19: 5422–5434
32 Do T, Baral E R, Kim J G. Chemical recycling of poly(bisphenol A carbonate): 1,5,7-triazabicyclo[4.4.0]-dec-5-ene catalyzed alcoholysis for highly efficient bisphenol A and organic carbonate recovery. Polymer, 2018, 143: 106–114
33 Zhejiang Sci-Tech University, Zhejiang Petrochemical Co., Ltd. The application of quaternary ammonium base as A catalyst in the alcoholysis of polycarbonate and the alcoholysis method of bisphenol A type polycarbonate (in Chinese). China patent, CN202411169900.9, 2024 [浙江理工大学, 浙江石油化工有限公司. 季铵碱作为聚碳酸酯醇解中的催化剂的应用及双酚A型聚碳酸酯的醇解方法. 中国专利, CN202411169900.9, 2024]
34 Zhejiang Petrochemical Co., Ltd., Zhejiang Sci-Tech University. A catalytic method for recovering bisphenol A from alcohol-hydrolyzed polycarbonate (in Chinese). China patent, CN202410412275.X, 2024 [浙江石油化工有限公司, 浙江理工大学. 一种催化醇解聚碳酸酯回收双酚A的方法. 中国专利, CN202410412275.X, 2024]
35 Jehanno C, Demarteau J, Mantione D, et al. Synthesis of functionalized cyclic carbonates through commodity polymer upcycling. ACS Macro Lett, 2020, 9: 443–447
36 Liu F, Li L, Yu S, et al. Methanolysis of polycarbonate catalysed by ionic liquid [Bmim][Ac]. J Hazard Mater, 2011, 189: 249–254
37 Liu F, Guo J, Zhao P, et al. Novel succinimide-based ionic liquids as efficient and sustainable media for methanolysis of polycarbonate to recover bisphenol A (BPA) under mild conditions. Polym Degradation Stability, 2019, 169: 108996
38 Liu M, Guo J, Gu Y, et al. Pushing the limits in alcoholysis of waste polycarbonate with DBU-based ionic liquids under metal- and solvent-free conditions. ACS Sustain Chem Eng, 2018, 6: 13114–13121
39 Manal A K, Saini G, Srivastava R. Solvent-free chemical upcycling of poly(bisphenol A carbonate) and poly(lactic acid) plastic waste using SBA-15-functionalized basic ionic liquids. Green Chem, 2024, 26: 3814–3831
40 Song X, Hu W, Huang W, et al. Methanolysis of polycarbonate into valuable product bisphenol A using choline chloride-based deep eutectic solvents as highly active catalysts. Chem Eng J, 2020, 388: 124324
41 Huang W, Wang H, Hu W, et al. Degradation of polycarbonate to produce bisphenol A catalyzed by imidazolium-based DESs under metal-and solvent-free conditions. RSC Adv, 2021, 11: 1595–1604
42 Payne J M, Kamran M, Davidson M G, et al. Versatile chemical recycling strategies: Value-added chemicals from polyester and polycarbonate waste. ChemSusChem, 2022, 15: e202200255
43 Zhang Q, Hu C, Li P Y, et al. Solvent-promoted catalyst-free recycling of waste polyester and polycarbonate materials. ACS Macro Lett, 2024, 13: 151–157
44 Zhang Q, Wang N, Hu C, et al. CO_2 catalyzed recycling of polyester and polycarbonate plastics. Green Chem, 2024, 26: 11976–11983
45 Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences. A method for ammonolysis of aromatic polycarbonate catalyzed by zinc catalyst (in Chinese). China patent, CN202111136228.X, 2023 [中国科学院青岛生物能源与过程研究所. 一种锌催化剂催化芳香族聚碳酸酯氨解的方法. 中国专利, CN202111136228.X, 2023]
46 Demarteau J, O'Harra K E, Bara J E, et al. Valorization of plastic wastes for the synthesis of imidazolium-based self-supported elastomeric ionenes. ChemSusChem, 2020, 13: 3122–3126
47 Lee H W, Lee J Y, Borchardt L, et al. Catalyst- and solvent-free depolymerization of poly(bisphenol A carbonate): Aminolysis. Green Chem, 2025, 27: 11928–11935

48 Wang Z, Yang R, Xu G, et al. Chemical upcycling of poly(bisphenol A carbonate) plastic catalyzed by ZnX_2 via an amino-alcoholysis strategy. ACS Sustain Chem Eng, 2022, 10: 4529–4537

49 Edge M, Yadav N, Hmayed A A R, et al. Continuous flow depolymerization of polycarbonates and poly(lactic acid) promoted by supported organocatalysts. ChemSusChem, 2025, 18: e202500420

50 Quaranta E, Dibenedetto A, Nocito F, et al. Chemical recycling of poly-(bisphenol A carbonate) by diaminolysis: A new carbon-saving synthetic entry into non-isocyanate polyureas (NIPUreas). J Hazard Mater, 2021, 403: 123957

51 Quaranta E. Chemical upcycling of poly(bisphenol A carbonate) via sequential diamino-/methanolysis: A phosgeneless one-pot route to dimethyl dicarbamate esters. J Hazard Mater, 2025, 484: 136700

52 Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences. A method for depolymerizing polycarbonate materials using an amine-alcohol system (in Chinese). China patent, CN202111136205.9, 2023 [中国科学院青岛生物能源与过程研究所. 一种利用胺醇体系解聚聚碳酸酯材料的方法. 中国专利, CN202111136205.9, 2023]

53 Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences. A method for the amine alcoholysis of polycarbonate catalyzed by zinc catalyst under mild conditions (in Chinese). China patent, CN202111135201.9, 2023 [中国科学院青岛生物能源与过程研究所. 一种温和条件下锌催化剂催化聚碳酸酯胺醇解的方法. 中国专利, CN202111135201.9, 2023]

54 Zhou X, Chai M, Xu G, et al. Catalyst-free amino-alcoholysis depolymerization strategy: A facile and powerful tool for chemical recycling of poly(bisphenol A carbonate). Green Chem, 2023, 25: 952–959

55 Jung H J, Park S, Lee H S, et al. Chemical upcycling of waste poly(bisphenol A carbonate) to 1,4,2-dioxazol-5-ones and one-pot C-H amidation. ChemSusChem, 2021, 14: 4301–4306

56 Pal S K, Prabhudesai V S, Mohanty K, et al. Red mud as a potential catalyst for petrochemicals production from oxygenated aromatic plastic wastes via fast pyrolysis. ChemCatChem, 2025, 17: e202401411

57 Dongguan University of Technology. A solvent-free depolymerization utilization method for waste polycarbonate (in Chinese). China patent, CN202010041660.X, 2023 [东莞理工学院. 一种废旧聚碳酸酯无溶剂解聚利用方法. 中国专利, CN202010041660.X, 2023]

58 Luo J H, Deng J. Direct synthesis of a jet fuel range dicycloalkane from polycarbonate waste at a high concentration. ACS Sustain Chem Eng, 2023, 11: 17120–17129

59 Manal A K, Shanbhag G V, Srivastava R. Design of a bifunctional catalyst by alloying Ni with Ru-supported H-beta for selective hydrodeoxygenation of bisphenol A and polycarbonate plastic waste. Appl Catal B-Environ, 2023, 338: 123021

60 Liu J, Wei J, Feng X, et al. Ni/HZSM-5 catalysts for hydrodeoxygenation of polycarbonate plastic wastes into cycloalkanes for sustainable aviation fuels. Appl Catal B-Environ, 2023, 338: 123050

61 Liu J, Wang N, Liu S, et al. Catalytic hydrodeoxygenation of mixed plastic wastes into sustainable naphthenes. JACS Au, 2024, 4: 4361–4373

62 Alberti C, Scheliga F, Enthaler S. Depolymerization of end-of-life poly(bisphenol A carbonate) via transesterification with acetic anhydride as depolymerization reagent. ChemistrySelect, 2019, 4: 2639–2643

63 Moyilla N, Padhi G, Kalsi D, et al. Copper/iron cocatalyzed depolymerization of postconsumer polycarbonate: A one-pot strategy to synthesize aryl ethers. ACS Sustain Chem Eng, 2024, 12: 18362–18372

64 Zhang M, Bai Y, Wang Z, et al. Targeted valorization of waste polycarbonate into bisphenol A dimethyl ether. Chem Eng J, 2024, 500: 156914

65 Antonakou E V, Kalogiannis K G, Stephanidis S D, et al. Pyrolysis and catalytic pyrolysis as a recycling method of waste CDs originating from polycarbonate and HIPS. Waste Manage, 2014, 34: 2487–2493

66 Lee T, Jung S, Baek K, et al. Functional use of CO_2 to mitigate the formation of bisphenol A in catalytic pyrolysis of polycarbonate. J Hazard Mater, 2022, 423: 126992

67 Feng S, Li K, Li Z, et al. NaOH solution-assisted pyrolysis of waste polycarbonate for co-production of phenolic compounds and supercapacitor material. Polym Degradation Stability, 2023, 212: 110363

68 Yang W, Choi D, Yu H K, et al. A strategic recovery of value-added monomer from polycarbonate waste through catalytic pyrolysis on ultra-high porous MgO. J Environ Manage, 2025, 373: 123564

69 Wang L, Li G, Cong Y, et al. Direct synthesis of a jet fuel range dicycloalkane by the aqueous phase hydrodeoxygenation of polycarbonate. Green Chem, 2021, 23: 3693–3699

70 Zhang Y, Jiang J, Wu J, et al. Upcycling waste polycarbonate plastics into jet fuels over NiCo/C by catalytic tandem hydropyrolysis/hydrodeoxygenation. Fuel Processing Tech, 2023, 247: 107809

71 Zhang Y, Wang J, Jiang J. Efficient polycarbonate plastic upcycling into jet fuel cycloalkanes over a bifunctional MoCo/NiC hetero-catalyst. Chem Eng J, 2024, 500: 156733

72 Zhou G, Ren C, Zhang X, et al. Innovative upcycling of polyesters and polycarbonates via manganese-catalyzed hydrogenolysis. J Catal, 2025, 446: 116060

73 Jones G O, Yuen A, Wojtecki R J, et al. Computational and experimental investigations of one-step conversion of poly(carbonate)s into value-added poly(aryl ether sulfone)s. Proc Natl Acad Sci USA, 2016, 113: 7722–7726

74 Lei W, Fang C, Zhou X, et al. Morphology and thermal properties of polyurethane elastomer based on representative structural chain extenders. ThermoChim Acta, 2017, 653: 116–125

75 Wu C H, Chen L Y, Jeng R J, et al. 100% atom-economy efficiency of recycling polycarbonate into versatile intermediates. ACS Sustain Chem Eng, 2018, 6: 8964–8975

76 Huang Y C, Huang Y H, Chen L Y, et al. Robust thermoplastic polyurethane elastomers prepared from recycling polycarbonate. Polymer, 2021, 212: 123296

77 Jiang T W, Reddy K S K, Chen Y C, et al. Recycling waste polycarbonate to bisphenol A-based oligoesters as epoxy-curing agents, and degrading epoxy thermosets and carbon fiber composites into useful chemicals. ACS Sustain Chem Eng, 2022, 10: 2429–2440

78 Li C, Yan G, Dong Z, et al. Upcycling waste commodity polymers into high-performance polyarylate materials with direct utilization of capping agent impurities. Nat Commun, 2025, 16: 2482

79 Raza S, Ghasali E, Raza M, et al. Advances in technology and utilization of natural resources for achieving carbon neutrality and a sustainable solution to neutral environment. Environ Res, 2023, 220: 115135

80 Vidal F, van der Marel E R, Kerr R W F, et al. Designing a circular carbon and plastics economy for a sustainable future. Nature, 2024, 626: 45–57

81 Zhou X, Zhai Y, Ren K, et al. Life cycle assessment of polycarbonate production: Proposed optimization toward sustainability. Resour Conservation Recycling, 2023, 189: 106765

82 Yue W, Yin C F, Sun L, et al. Biodegradation of bisphenol-A polycarbonate plastic by *Pseudoxanthomonas* sp. strain NyZ600. J Hazard Mater, 2021, 416: 125775

83 Kim H W, Lee J, Kim S, et al. Exploring a novel metallophosphoesterase for polycarbonate degradation via transcriptome analysis. J Hazard Mater, 2025, 493: 138330

84 Wang S, Gong Z, Hübner R, et al. Pickering emulsion biocatalysis with engineered living cells for degrading polycarbonate plastics. Small, 2025, 21: 2504376

Advances and trends in the chemical recycling of bisphenol-A polycarbonate

TANG JingQiu[1,2], LIU Yi[2,3], LYU JiaYi[1,2], KUERLAI SaiLiKeHan[1,2], XU RiDongSheng[1,2], DENG HanRu[1,2], TU XinLin[1,2], WU ZeXiang[1,2], BAI Yue[1,2], ZHANG MingHao[1,2] & MEI QingQing[1,2,3]

[1] *State Key Laboratory of Soil Pollution Control and Safety, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China*
[2] *College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China*
[3] *Innovation Center of Yangtze River Delta, Jiaxing 311400, China*

Bisphenol A-based polycarbonate (BPA-PC) is widely applied due to its excellent properties, but its waste accumulation in the environment has become a major source of greenhouse gas emissions and bisphenol A (BPA) release. Efficient recycling is therefore essential for resource circularity and pollution and carbon reduction. This review systematically summarizes recent progress in the chemical recycling of BPA-PC, focusing on catalytic in situ upgrading strategies for the selective conversion of BPA-PC into high-value chemicals. Specifically, it details precise depolymerization and functionalization strategies for the two structural units of BPA-PC, BPA and alkyl carbonate, including hydrolysis, alcoholysis, ammonolysis, hydrogenolysis, and other methods, and emphasizes in situ value-addition reactions such as cyclization and etherification. These approaches have successfully produced a range of high-value chemicals, including aromatics, phenols, alkanes, ethers, and carbonates. Furthermore, current research is moving beyond pure monomer repolymerization, focusing instead on integrated strategies that combine depolymerization, conversion, and polymerization. This shift opens new avenues for the high-value utilization of complex waste streams. Key challenges, such as designing efficient catalysts, enabling in-situ CO_2 utilization, and ensuring adaptability to diverse systems, are actively addressed, offering a pathway toward green circular processes and closed-loop carbon resource management.

polycarbonate, chemical recycling, catalytic conversion, high-value utilization, resource circularity

doi: 10.1360/SST-2025-0173