引用本文：邹雨 , 陈伟鹏, 麦耀舜, 王伟, 夏勇, 周欣. 废弃PET催化氢解材料 [J]. 离子交换与吸附, 2025, 41(1): 27-45.
Citation: ZOU Yu-chong, CHEN Wei-peng, MAI Yao-shun, WANG Wei, XIA Yong, ZHOU Xin. Catalysts for Hydrogenesis of PET Waste [J]. Ion Exchange and Adsorption, 2025, 41(1): 27-45.

·综述·

文章编号：1001-5493(2025)01-0027-19 DOI: 10.16026/j.cnki.iea.2024010018

废弃PET催化氢解材料*

邹雨翀[1], 陈伟鹏[1], 麦耀舜[1], 王伟[1], 夏勇[2**], 周欣[1**]

([1]华南理工大学化学与化工学院, 广州 510640; [2]菲利科思新材料有限公司, 上海 201507)

摘 要：作为全球消耗量最大的塑料之一，PET (聚对苯二甲酸乙二醇酯) 在食品包装、饮料瓶、纺织品、建筑等领域得到广泛应用。然而，PET不断增长的废弃物排放给环境可持续发展带来压力。与焚烧或降解为CO_2的技术相比，将PET氢解为化工原料并实现高值利用的催化氢解技术近年来受到关注。该技术可在实现废弃物资源化利用的同时带来经济效益。目前，催化氢解技术尚未投入工业应用，其面临的主要挑战在于关键催化材料的催化性能和制备成本。因此，发展高性能催化剂是实现催化氢解技术工业应用的关键。文章综述了PET催化氢解技术的发展现状，特别是关键催化材料的研究进展，归纳了主要催化剂的设计策略，在此基础上探讨了高效PET催化氢解材料的未来发展方向，以期为PET催化氢解技术的进一步发展提供支持。

关键词：催化氢解，PET，催化剂，废物资源化

中图分类号：O6-1 **文献标志码：**A

1 前 言

塑料是重要的有机高分子材料，其具有独特的柔性、塑性、耐腐蚀性和相对低廉的生产成本[1]，现已渗透到人们生活的方方面面[2]。然而，废弃塑料也造成了严重的环境问题。据统计，1950—2017年，全球塑料产量达到92亿t，其中约70亿t最终成为塑料废弃物[3]。每年约有1400万t废弃塑料进入海洋，这些废弃塑料不仅会通过缠结对海洋生物造成伤害[4]，还可溶解形成微塑料颗粒，并通过食物链对人类造成氧化应激和恶性肿瘤等生理危害[5-6]。其中，PET (聚对苯二甲酸乙二醇酯) 是废弃塑料的最大组成之一[7]。PET具有化学稳定性优异、透明度可调节、力学强度高、成本效益大等优点，被广泛用于制造塑料瓶、塑料薄膜、食品包装和合成纤维等材料[8]。2021年，全球PET产量为8200万t，已成为全球第6大生产塑料和第3大商业包装塑料[9-10]。与此同时，其排放量占全球固体废弃物总量的12%[11-12]，且近年来仍在快速增长[13]，我国废弃PET达到550万t[14-16]。因此，如何降低废弃PET对环境的影响已成为亟待解决的社会问题。

2 废弃PET处理

目前，仅有7%的废弃PET被回收，更多的PET最终被丢弃在陆地和海洋中[17]。由于分子中芳香结构的存在，废弃PET化学性质相当稳定，在自然环境中对水解和微生物分解机制均不敏感。如果对废弃PET进行填埋处理，需100~1000年才能完全降解[18]，且此过程会产生大量CO_2。与生产原生PET相比，回收rPET (再

* **收稿日期：**2024-03-26
基金项目：国家自然科学基金 (基金号22378138).
作者简介：邹雨翀 (2003—), 学士.
****通信作者：**周欣, E-mail: xinzhou@scut.edu.cn; 夏勇, E-mail: mxia@phelix.cn.

生 PET) 可减少 58.8% 的碳排放[19-20]，若使用 rPET 替代原生 PET，生产每吨 PET 可减少 103.7 kg 的 CO_2 排放[3]。因此，制定科学的废弃 PET 回收处理策略对环境的可持续发展十分重要，其循环再生利用技术具有重要的工业价值。

PET 的回收和处理极具挑战性。过去 20 年，填埋和焚烧是世界范围内最常见的塑料垃圾处理方法[21-22]，然而毒物释放和土壤中毒使其成为不可持续的“无循环”方法，其实际应用受到限制[23-24]。与之相比，机械回收法可将废弃塑料转化为二次产品，从而减少废弃物排放和环境污染，因此该法更有价值也更可持续。目前，机械回收法是 PET 回收领域最成熟的技术，占据 PET 回收市场 63.7% 的市场份额[14]。根据技术的不同，机械回收法分为降级回收法和闭环回收法。降级回收法是指将废弃 PET 剪切、熔化并制成以 PET 纤维和非食品接触瓶为主的 rPET，其包含除污、切碎、研磨和高温处理等操作，会降低聚合物的物理强度和透明度[25]。闭环回收法通常将 rPET 加入原生 PET 中生产新的产品，充分利用 rPET 并实现 rPET 的闭环利用。闭环回收法降低了 PET 的生产成本，有效减少了废弃 PET 排放。然而，由于废弃 PET 含有多种内源添加剂和外源污染物，在每次循环过程中，高温和机械加工都会使产品性能大幅下降[26-28]，最终生成的垃圾仍需被填埋和焚烧，因此，废弃 PET 的机械回收法呈现线性经济模型 (图 1)。

相比于机械回收法呈现的降级回收 (Downcycling) 线性经济模型，利用化学回收法对废弃 PET 再利用的循环经济模型更为理性 (图 1)[29]。化学回收法是指将 PET 分解为小分子产物或其他高值产物，进而生产新的 PET 和其他增值化学品，实现资源的再利用[30-33]，被称为“升级回收 (Upcycling)”。化学回收法的温室气体排放量仅为机械回收法的 1/6，在实际生产中更加环保[34-36]。目前常用的 PET 化学回收法有甲醇解、水解、糖酵解、氨解、氢解等。甲醇解、水解、氨解和糖酵解属于均相反应体系，有利于工业放大，但反应中会使用大量的溶剂和解聚剂，且难以将产物、反应物和催化剂相互分离。这不仅会导致残余催化剂对下游 PET 产品的性能产生负面影响，还会导致催化剂解离出的有毒金属离子对生态环境造成污染，对人类健康产生危害[37]。其中，糖酵解的产率与 PET 的粒度有很强的相关性，需使用高值的醇作为亲核试剂，且糖酵解反应过程缓慢。在水解过程中，由于水是一种弱亲核试剂，进攻羰

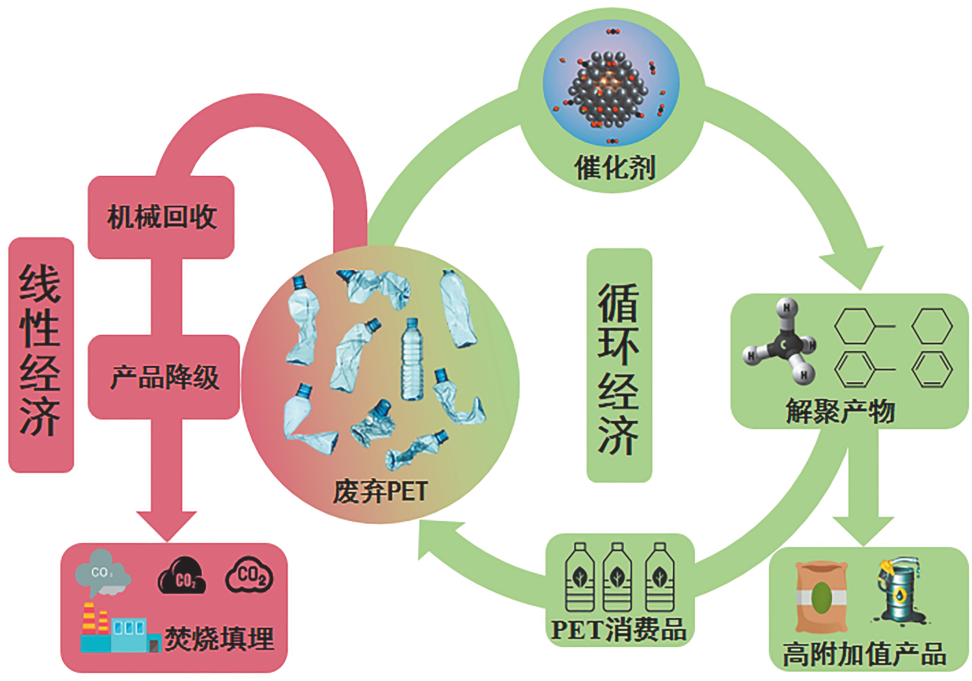


图 1 回收 PET 的线性经济模型和循环经济模型.

Figure 1 Linear economic model and circular economic model for recycled PET.

基碳正离子的能力有限，导致反应较慢[38]，若想加快反应速率，则需加入大量腐蚀性强的酸碱试剂，增加投料成本的同时也会增加设备维护成本。氨解可在工业生产中产生高值产品，如甲胺、乙胺、乙醇胺和无水正丁胺。然而，氨解PET需暴露在阳光下60 d才能实现完全分解[39]。为加快反应速度，需对其进行微波处理[40]，这进一步增加了生产成本。因此，亟须开发更加高效的催化技术用于PET的回收利用。

3 催化氢解技术

表1从原料成本、产品价值、分离难度等因素出发，对PET的不同化学解聚方法进行了比较，其中氢解技术表现出多种优势：(1) 近几年，我国氢能产业快速发展，H_2价格相对较低，可满足工业化生产需求；(2) 反应可发生在无溶剂体系中，降低了分离能耗与工艺成本；(3) 反应程度可调控，以满足产生相应高值产品的需求，例如可在一定氢解条件下将PET解聚为其原料单体，也可在进一步提高氢解程度的工艺中得到液态有机氢载体[41]；(4) 原子经济性高，有利于满足绿色化工的可持续发展需求[42]。在氢解反应中，催化剂至关重要。一方面，高性能催化剂让反应在温和条件下进行，提高了工艺的经济效率[43]；另一方面，经结构设计优化的催化活性中心可提高C—O键断裂的产物选择性，根据生产需要得到增值产品或用于高品质PET生产的PTA单体。

表1 PET不同化学解聚方法的对比.

Table 1 Comparison of different chemical depolymerization methods of PET.

分解方式	条件	试剂	产物	选择性[a]
糖酵解[44-46]	180～240 ℃	二醇、酯交换催化剂	BHET[b]	中
水解[38, 46]	强酸/强碱	强酸/强碱	PTA[c], EG[d]	中/低
水解[38, 46]	中性水蒸气	酯交换剂	PTA	中
甲醇解[38, 46]	180～280 ℃, 20～40 atm	甲醇	DMT[e], EG	高
氨解[39-40, 46]	20～100 ℃	胺基有机物	对苯二甲酸酰胺, EG	中

注：a为对底物敏感程度；b为对苯二甲酸乙二醇酯；c为碱性条件得到相应的盐，强酸酸化后产出PTA；d为乙二醇；e为对苯二甲酸二甲酯。

为实现PET的高效氢解，需阐明PET的结构与断键机理。如图2所示，从结构上看，PET与包括木质素、纤维素、几丁质和甘油三酯在内的多种生物质具有相似的化学结构特征，即均由不同的单体通过C—O键构成芳香聚合物。从断键机理上看，PET与生物质解聚的核心均为C—O键的选择性断裂。借鉴研究已有较多积累的生物质氢解催化剂的催化机理设计PET氢解催化剂，可节约开发催化剂的成本。根据催化体系的不同，催化氢解技术分为均相催化和多相催化，本节分别从均相催化剂和多相催化剂出发，对近年的PET氢解催化剂进行综述。

3.1 均相催化剂

钌基分子催化剂作为一种均相催化剂，是最早应用于PET氢解的催化剂[47]，具有以下优点：(1) 可从分子水平上设计催化剂，通过优化催化剂的组成和结构以调节催化剂的活性和选择性；(2) 具有较高的配位反应活性和选择性等。由于PET中酯羰基的亲电性相对较低，在温和条件下催化加氢生成醇非常困难，常规的工业催化剂难以实现。因此，直接加氢裂解酯的反应主要由高活性的钌基分子催化剂催化[48-49]。钌基分子催化剂包括Ru(II)PNN[50]、Ru(II)CNN[51]、Ru(triphos)tmm[52]、Ru(triphos-xyl)tmm[52]等钳形配合物。

钌基分子催化剂在酯的催化氢解过程中表现出高催化活性和高二醇选择性优势，其设计思路是在吡啶螯合体系中，通过增强以吡啶为核心的芳构化—脱芳构化协同作用，活化酯基C═O键[53]。Zhang等[50]使用Ru(II)PNN作为催化剂，成功催化了多种芳香族酯和脂肪族酯转化为醇的氢解反应。Balaraman等[51]利用具有良好定义的富电子联吡啶基Ru(II)PNN和Ru(II)CNN钳形配合物实现了环二酯的完全均相催化反应。上述酯类物质C═O键结构与PET相似，其催化剂设计思路为PET氢解催化剂的设计提供了启示。Krall等[47]首次将Ru(II)PNN应用于

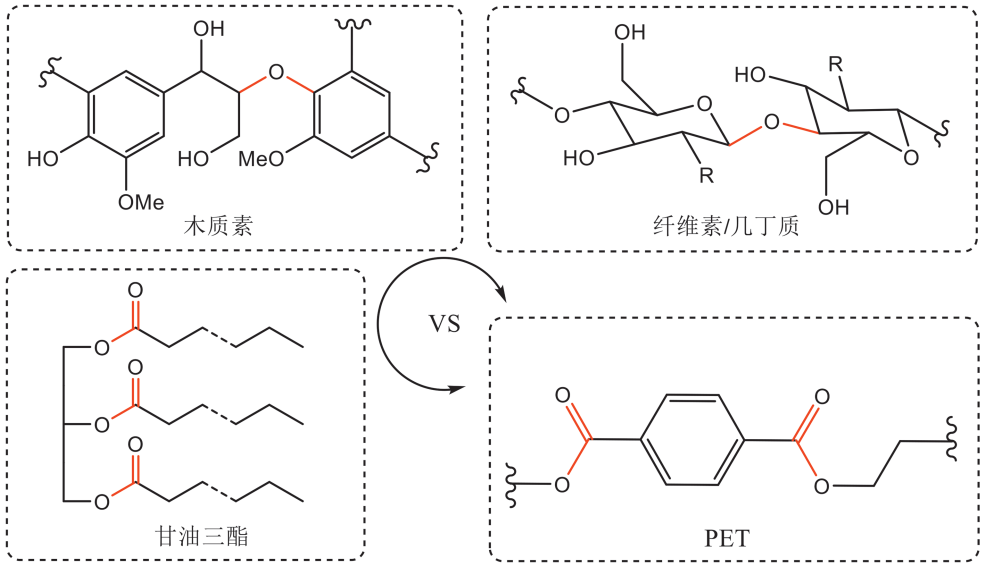


图2 生物质与PET结构示意图和断键位置对比.

Figure 2 Schematic diagrams of the structures of biomass and PET, and comparison of bond-breaking positions.

废弃PET的催化氢解，得到了转化率>99%的增值产品PXG (对苯二甲醇) 和EG。该催化剂体系对商业树脂中的颜料和添加剂等杂质具有耐受性，为PET的回收开创了新模式。Westhues等[52]通过配体修饰合成了稳定性更好、活性更高的Ru(triphos-xyl)tmm催化剂，用于催化氢解PET及其消费品和附加聚合物。该催化剂在更低的负载下对PXG和EG表现出极高的选择性和转化率，活性更高。

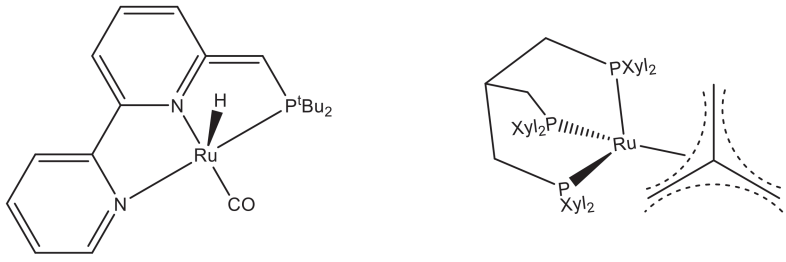
表2总结了不同钌基分子催化剂催化氢解PET的性能。钌基分子催化剂的催化活性高，催化产物为高值的二醇，是首次实现PET氢解的催化剂。该催化剂对PET的选择性强，不受反应体系中其他杂质的影响，解决了机械回收法中产品降级的问题。但上述实验并没有阐述钌基分子催化剂用于PET催化氢解的反应历程，反应需较高的H_2压力、较长的反应时间，且均相体系难分离；同时，钌基分子催化剂具有价格昂贵、对空气敏感、配体复杂 (图3)、不能重复利用且有毒等缺陷，阻碍了其在PET氢解中的应用。

表2 钌基分子催化剂催化性能.

Table 2 Catalytic performance of ruthenium-based molecular catalysts.

催化剂	底物	催化剂用量	溶剂	反应条件	产率[a]/%
Ru(II)PNN [b][47]	PET	50:1:2[c]	苯甲醚THF	50.4 atm, 160 ℃, 24 h	>99
Ru(triphos-xyl)tmm $HNTf_2$ [d][49]	着色水瓶	0.5 mol%[e]	1,4 -二恶烷	100 bar, 140 ℃, 16 h	>99
Ru(triphos-xyl)tmm $HNTf_2$[49]	枕头	0.5 mol%	1,4 -二恶烷	100 bar, 140 ℃, 16 h	>99
Ru(triphos-xyl)tmm $HNTf_2$[49]	酸奶罐	0.5 mol%	1,4 -二恶烷	100 bar, 140 ℃, 16 h	>99
Ru(triphos-xyl)tmm $HNTf_2$[49]	运动球衣	0.5 mol%	1,4 -二恶烷	100 bar, 140 ℃, 16 h	>99
Ru(triphos-xyl) tmm $HNTf_2$[49]	含PET, PP和PE的水瓶[f]	0.2 mol%	1,4 -二恶烷	90 bar, 140 ℃, 16 h	>99

注：a为PTA和PXG的总产率；b：催化剂前驱体用KOtBu在N_2下活化5 min，然后转移到含有聚合物的压力反应器中，将反应混合物加压并加热至目标温度48 h；c为聚合物重复单元，催化剂前驱体：KOtBu；d为助催化剂；e为催化剂物质的量占底物物质的量的百分比；f：PP是聚丙烯，PE是聚乙烯。



Ru(II)PNN　　Ru(triphos-xyl)tmm

图 3 Ru(II)PNN 和 Ru(triphos-xyl)tmm的结构示意图.

Figure 3 Schematic diagrams of the structures of Ru(II)PNN and Ru(triphos-xyl)tmm.

3.2　多相催化剂

相较于均相催化剂，多相催化剂具有易与产品分离、可回收利用、稳定性高的优点，可在更温和的实验条件下获得高产率[54]，克服了上一节提及的均相催化剂存在的缺点。目前，用于PET催化氢解的多相催化剂主要有MOFs (金属有机框架)、金属氧化物催化剂、金属催化剂等。其中，MOFs的特殊孔道结构能提供活性位点，便于结构表征和机理研究；金属氧化物催化剂和金属催化剂在稳定性、活性和选择性方面更为理想，用于工业催化氢解PET前景广泛。

3.2.1　MOFs (金属有机框架)

MOFs是一类新型的结晶型多孔材料[55]，结构高度有序，具有超大的比表面积、多孔结构、孔径和尺寸的可调性[56]，可克服机理研究的困难；同时，其金属中心上具有丰富的Brønsted和Lewis酸性位点，可用于催化氧化、酯化、水解等反应。在过去的研究中，MOFs催化氢解PET的原理以C—O键的β-断裂为主。在氢解方面，Wei等[57]首次报道利用UiO-66 (Zr-bdc)催化氢解PET并得到MMT (对苯二甲酸单甲酯)和PTA (图4)，该过程的总转化率较高且不受底物中其他塑料的影响。在缺少UiO-66框架的对照实验中，活性组分ZrO_2和Zr_6团簇催化活性大幅下降。这是由于UiO-66作为载体，能分散金属活性位点，使其不因聚集而失活，类似的现象在其他催化工艺中也有报道[58-59]，这证明了UiO-66在稳定活性位点中发挥着重要作用。在改用Ar氛围替代H_2氛围的对照实验中，UiO-66催化氢解反应的产率未发生明显变化，说明该过程主要通过C—O键的β-断裂机制实现。然而，这种机制将生成MMT和PTA，产品难以分离。同时，产物中的PTA在解聚过程中将与UiO-66发生配体交换转化为MIL-140A，使UiO-66催化性能迅速降低。由于MOFs仍面临上述催化机理和结构稳定性挑战，当前可用于PET氢解的MOFs报道并不多，知名的ZIF系列、MIL系列等MOFs材料在该领域的应用仍未见报道。

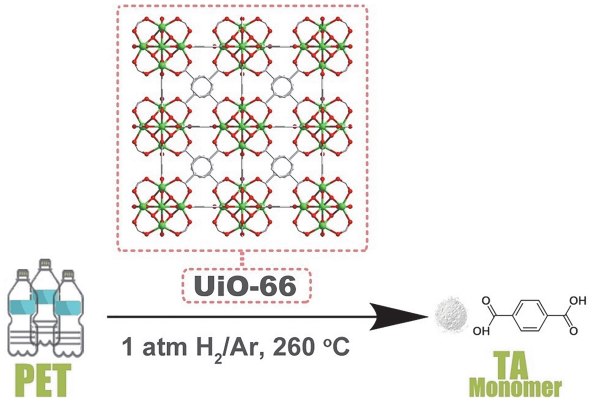


图 4 UiO-66催化氢解PET的示意图[57].

Figure 4 Schematic diagram of the hydrogenolysis of PET catalyzed by UiO-66[57].

3.2.2　金属氧化物催化剂

金属氧化物可利用其Lewis酸性位点 (例如NbO_x、MoO_x、TiO_x、ReO_x、WO_x、TaO_x、VO_x等)，通过共价成键和化学吸附含氧官能团促进C—O键的激活[60-61]。Du等[62]使用CaO和ZSM-5在多级反应器中催化氢解PET地毯，得到了富苯油品。Diaz-Silvarrey等[63]使用SZ (强酸性硫酸氧化锆)催化氢解PET，在450～600 ℃下获得了27%～32%的苯甲酸，并提高了轻烃 (C_1～C_3) 的回收率。Kumagai等[64]在450 ℃对PET进行热解，然后用金属氧化物 (ZnO、MgO、TiO_2和ZrO_2) 在700 ℃催化热解初级产物，最终得到富苯芳烃。这些催化剂大多采用复杂的多级反应器对PET的一次热解产物进行二次裂解，反

应过程通常伴随着脱羧反应和剧烈的裂解反应，导致PET侧链难以保存，大部分热解产物直接转化为CO_2、CO和炭黑，从而造成产物浪费。

PET氢解的关键在于C—O键的断裂，在H原子的攻击和转移下形成羧酸和烯烃。寻找合适的金属氧化物催化位点，制备具有适当C—O键断裂能力和加氢能力的催化剂成为设计金属氧化物催化剂的研究热点。Mouat等[65]设计了一种具有高活性和选择性的单位点MoO_2催化剂用于酯交换反应。Xiao等[66]报道了一种MoO_x/C催化剂用于木质素的氢解，获得了高收率的苯酚。Junhong等[67]利用Mo配合物作为催化剂前驱体，在Ar氛围中制备并活化了氢解催化剂，该催化剂在4-硝基苯乙烯加氢反应中表现出较高的热稳定性和选择性。这些研究聚焦于C—O键的断裂，对PET的氢解具有一定的参考意义。Kratish课题组[68]采用介孔碳作为载体，MoO_2作为活性中心，合成MoO_2/C催化剂，首次提出用无溶剂法催化氢解废弃PET。该材料催化过程基本不受添加剂影响，易回收、活性稳定，可循环使用。Liu等[69]改良MoO_2/C催化剂用于PET催化氢解，通过调节反应条件，实现了零炭黑生产高纯度PTA，催化剂加氢能力适宜，有效避免了PET侧链断裂和过度加氢，产物选择性高。

MoO_2/C能精准断裂PET内的C—O键，生成苯甲酸聚乙烯酯，随后H_2参与反应，还原双键生成PTA (图5)。在催化氢解中，MoO_2作为催化活性中心实现了PET的高效氢解，活性炭作为载体，与金属活性中心进行协同催化，提升了催化效率，用于无溶剂H_2体系催化氢解PET极具前景。此外，MoO_2/C原料来源丰富、制备成本低，PTA产率优于MOFs，且稳定性良好。但现有金属氧化物催化剂在反应过程中需通入高压H_2以避免积碳问题，这对反应设备要求较高。未来可考虑采用内源氢替代高压H_2，以满足工艺和设备的苛刻要求。

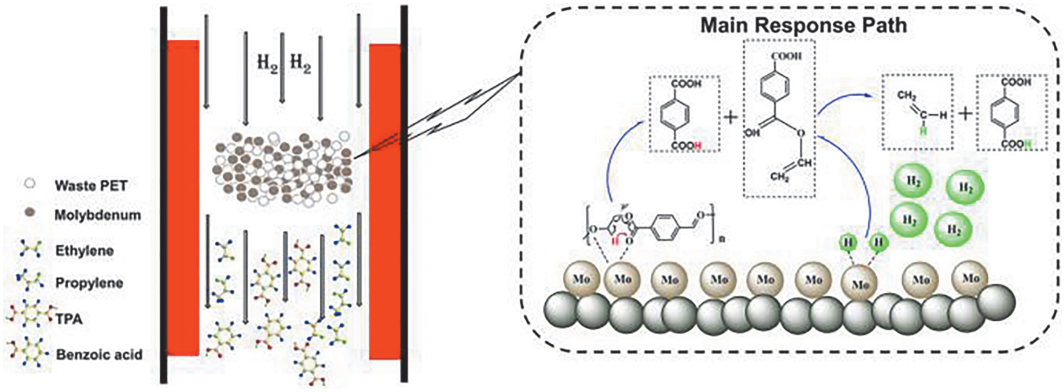


图 5 MoO_2/C催化氢解PET的反应途径示意图[69].

Figure 5 Schematic diagram of the reaction pathway for the hydrogenolysis of PET catalyzed by MoO_2/C[69].

3.2.3 金属催化剂

金属催化剂以金属 (团簇、纳米粒子、单原子) 作为活性位点，以炭材料或金属氧化物作为载体，是催化领域研究最为广泛的一类催化剂。当前对金属催化剂构效关系的研究已取得了一些重要进展。首先，金属催化剂固有的加氢能力是芳香族高聚物单体加氢脱氧的关键。若金属催化剂的氢化作用过强，可能导致芳香环氢化 (如Pt、Pd、Rh等)；反之，若氢化作用过弱，则可能无法有效脱氧 (如Au、Ag、Cu等)[70]。其次，金属纳米颗粒大小、电荷状态和产物选择性之间存在强烈的相互作用。更小的金属颗粒和增强的电荷态抑制了芳香族环在平面构型下的共吸附[71-72]，进而对芳香族产物表现出更高的选择性[73-75]。例如，较小的Ni颗粒有利于加氢脱氧，而较大的Ni颗粒在C—C键断裂中更活跃[76]。最后，载体和启动子通常在调控载体金属的电子和几何性质方面发挥积极作用。根据活性位点金属数目的不同，可将金属催化剂分为单金属催化剂和合金催化剂。

3.2.3.1 单金属催化剂 单金属催化剂以高催化活性的金属作为活性中心，结合特定的载体或助催化剂改良其结构和性能，进而实现高活性和高选择性。Dong等[77]使用多功能Ru/$NbOPO_4$催化剂来破坏天然/加工木质素中的单元间键，其作用包括：为苯环的强吸附提供一个Lewis

酸中心，作为 Brønsted 酸质子化和激活 C_{arom}—C_{aliph} 键，以及提供金属位点解离 H_2，使产生的 H 原子攻击被削弱的 C_{arom}—C_{aliph} 键。基于类似的设计原理，研究人员开发了一种 Ru/Nb_2O_5 催化剂用于芳香族聚合物的升级循环，该催化剂由小尺寸 Ru 团簇和作为 Brønsted 酸位点的表面羟基组成。经选择性氢解反应，芳香族聚合物的 C_{arom}—C_{aliph} 键断裂，解聚为芳香族低聚物。Shao 等[78]制备出多孔 Ru/Nb_2O_5 催化剂用于解聚木质素，其对木质素解聚的优异活性来自对酚类的强吸附、吸附时酚类物质中 C_{arom}—O 键解离能降低以及 Ru 与 Nb_2O_5 之间的协同作用，因此具有较高的芳烃选择性。Ru/Nb_2O_5 选择性断裂木质素中常见类型的键 (酯键、醚键和碳碳单键) 与芳烃塑料催化氢解得到单环芳烃的机理类似：(1) Nb_2O_5 上的 Ru 以低配位数 (5～6) 的亚纳米粒子存在，这种小体积加氢位点限制了 H_2 和芳香族环的共吸附，避免了苯环氢化，使该催化剂对芳香族产物有较高选择性[79]；(2) 在保持芳香环不被氢化的同时，NbO_x 激活 C—O 键，Brønsted 酸位点激活 C—C 键[80-82]，有效破坏 PET 中的 C—C 键，通过单元间 C—O 键和 C—C 键的选择性断裂将 PET 氢解为 PX (对二甲苯)；(3) $Ru^{\delta+}$ 的数量较多，且 Ru 和 Nb_2O_5 之间存在协同作用，在废弃塑料的 HDO (催化加氢脱氧) 中可限制不必要的脱羧反应[83]。Lu 等[83]报道了首例无 H_2 氛围下解聚 PET 的研究，通过 Ru/Nb_2O_5 催化剂释放部分乙二醇的氢 (图 6(A))，将 PET 转换为 BTX (苯、甲苯和二甲苯)。Jing 团队[84]使用 Ru/Nb_2O_5 催化剂断裂单元间 C—O 键和 C—C 键，将废弃塑料混合物和单一塑料解聚为芳烃 (图 6(B))，且 Ru/Nb_2O_5 可克服积碳的问题，多次循环后活性稳定。

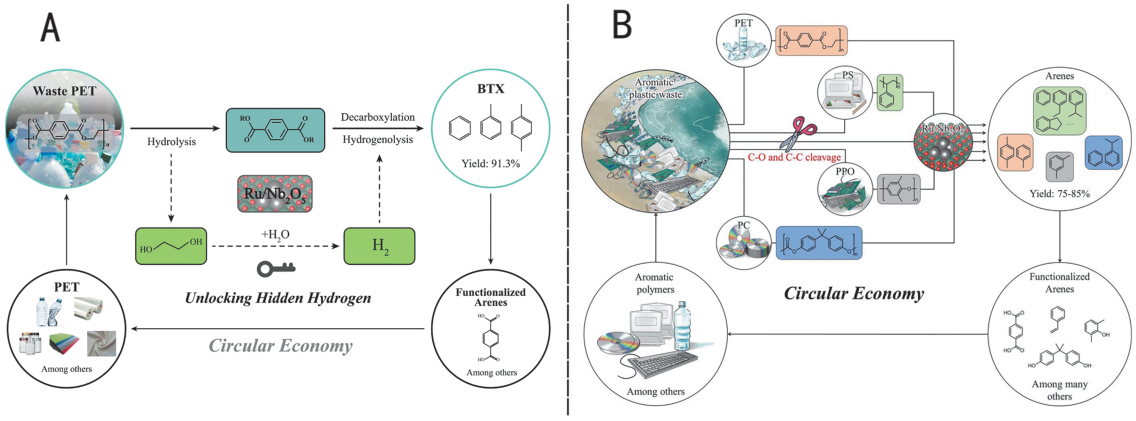


图 6 PET 在不同类型的 Ru/Nb_2O_5 催化剂上的转化: (A) PET 在无 H_2 氛围下解聚为 BTX[83]; (B) 芳烃塑料废物混合物和单一塑料解聚为芳烃[84].

Figure 6 Conversion of PET on different types of Ru/Nb_2O_5 catalysts: (A) Depolymerization of PET to BTX in the absence of H_2 atmosphere [83]; (B) Depolymerization of aromatic plastic waste mixtures and single plastics to aromatics [84].

对于同一活性金属，寻找合适的载体是实现单体高收率和高选择性的关键。近年来，Ru/TiO_2 催化剂得到广泛研究。Li 等[85]报道了一种纳米颗粒 Ru/TiO_2 催化剂，在 H_2 和水存在的环境下将 PET 完全氢解为烷烃，产物以环己烷和 CH_4 为主，总收率为 72.9% (图 7(A))。Murali 等[86]报道了双相体系中 Ru/TiO_2 催化剂通过水辅助完成一步 HDO，将 PET 定量转化为高密度 C_6~C_8 环烃，具有高选择性和高能效 (图 7(B))。多次循环中 Ru/TiO_2 的饱和环烃选择性均>90%，较为稳定，且 Ru 在 TiO_2 上的分散保持不变[87]，表明 Ru/TiO_2 稳定性强。Ru/TiO_2 催化剂用于 PET 氢解，优点体现在以下方面：(1) TiO_2 载体惰性相对较强，便于精确调节 Ru 的粒径[84]，进而提高 Ru 在 TiO_2 上的分散程度；(2) TiO_2 载体的亲氧性质有利于 C═O 键的氢化[88]；(3) TiO_2 载体与活性金属之间存在强相互作用[89-91]，在 Ru/TiO_2 中，电子从 TiO_2 载体流向 Ru 纳米粒子，从而使 Ru/TiO_2 具有同时催化 PET 氢解和中间加氢的能力；(4) TiO_2 具有与底物中 O 原子结合的缺陷位点[92-93] (5) TiO_2 作为载体有利于防止结焦[94]。除采用单一金属氧化物作为载体外，Ru 金属催化剂还可负载到复合体系上，将 PET 氢解为其他高值产物。Wei 等[41]开发了一个由 Ru-ReO_x/

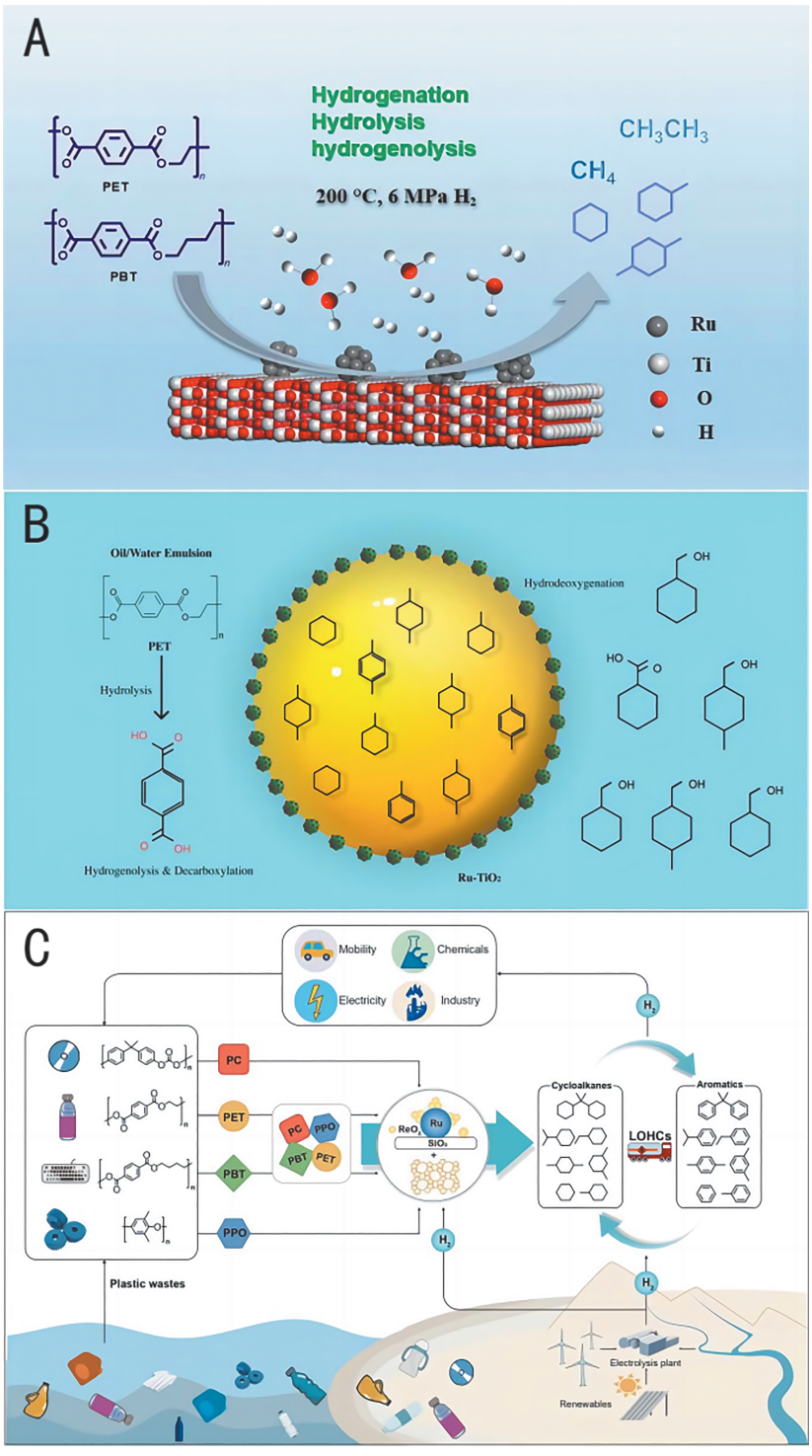


图 7 通过改变载体结构与组成调控催化剂的性能[57, 85-86].

Figure 7 Regulating the performance of catalysts by changing the structure and composition of the support[57, 85-86].

SiO_2+HZSM-5 组成的催化体系，在温和的反应条件下，将 PET、PC (聚碳酸酯)、PBT (聚对苯二甲酸丁二酯)、PPO (聚苯醚) 及其混合物通过 HDO 转化为环烷烃作为储氢材料 LOHC，混合解聚收率高达 99% (图 7(C))，理论储氢容量达到约 5.74 %。

除改变载体结构与组成外，还可通过调节活性金属尺寸调控催化剂的性能。Ye 团队[95]报道通过调节 Ru 粒径大小控制 Ru 配位数，进而改变 Ru 配位环境，可决定 PET 氢解的反应途径 (图 8(A))。当 Ru 粒径较小 (<1 nm) 时，PET 在配位数非常低的 Ru 位点上发生催化氢解，得到较

高的 CH_4 气体收率；当 Ru 粒径较大 (>1 nm) 时，Ru/TiO_2 催化剂有利于芳香族化合物吸附，Ru 粒径越接近 1 nm 芳烃产率越高，当 Ru 平均粒径为 1.1 nm，配位数约为 5.0 时，BTX 产率可达最大；当 Ru 粒径更大时，Ru/TiO_2 催化剂有利于苯环的氢化，形成环饱和产物和开环产物。多次循环后 BTX 产率保持不变，且在不使用 H_2 的情况下，Ru/TiO_2 未出现明显的烧结或浸出现象，表明 Ru/TiO_2 稳定性高。研究还发现，PET 加氢反应的主要氢源可能是水相重整而不是气相 H_2，这为 PET 氢解提供了一条不需要额外加 H_2 的途径。传统的纳米颗粒催化剂存在团聚、碳失活、贵金属原子利用率低、不同晶面催化选择性不一致等问题，在实际工业过程中受到限制[96-99]。单原子催化剂具有最高的原子利用率和相对均一的催化活性位点，可显著减少现有 Ru 纳米颗粒催化剂存在的问题[100-104]。Zhang 等[105]成功设计了负载在 CoAlO 上的 Ru 单原子催化剂，将 PP、PE、PET 混合塑料转化为 CH_4 (产率 > 90%)，并在 150 次催化循环后转化率基本不变 (图 8(B))，系统能源效率为 90.2%。

为降低使用贵金属的成本，非贵金属纳米颗粒分散在金属氧化物载体上的催化剂在氢解

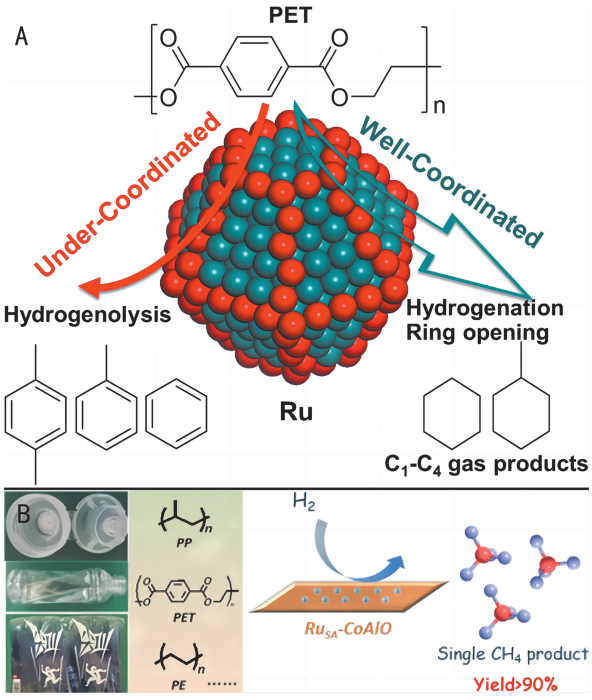


图 8 通过调节活性金属尺寸调控催化剂的性能[95, 105].

Figure 8 Regulating the performance of catalysts by adjusting the size of active metals[95, 105].

反应中得到了广泛研究。Hongkailers 团队[94]制备的 Co/TiO_2 催化剂能将 PET 高效氢解为芳烃化合物，其作用机理为催化剂的设计提供了思路：(1) Co 易分散并充分暴露在 TiO_2 表面，有利于底物接触活性位点[106]；(2) Co 活化 H_2 的同时增加了材料的酸度，从而增强了 TiO_2 对底物的吸附以促进 C—O 键断裂[107-111]；(3) Co 和 TiO_2 之间的强相互作用增强了催化剂的稳定性。但该材料存在活性金属与载体相变的问题，可回收性低，可从以下 2 个方面改进：(1) 掺入其他高活性金属制备为合金催化剂[112-114]；(2) 向载体中加入金属氧化物 (如 Al_2O_3、SiO_2) 以抑制 TiO_2 相变[115]，同时增大载体的比表面积[116]。

3.2.3.2　合金催化剂　合金催化剂的协同催化作用发生于金属与金属之间，一种金属作为 Brønsted 酸位点促进氧的吸附和活化，另一种金属负责氢的吸附和活化，从而克服了单金属催化剂的局限性，实现了更高的催化效率和选择性。金属的不同比例会影响催化剂结构，从而影响氢解 PET 的催化效率和产物类型。

Wu 等[117]基于 Mo 的氧亲和性和 Co 的氢活化性[118-119]合成 CoMo@NC 催化剂，这 2 种金属的结合显著提高了催化剂的酸性和复杂程度，有利于吸附酯基。同时，CoMo@NC 的高比表面积和均匀的孔隙结构有利于活性位点的暴露，促进氢的活化，从而能选择性催化氢解混合塑料，高收率制得单一产物 PTA (图 9(A))；该材料在 260 ℃下的催化稳定性远高于用浸渍还原法制得的其他合金催化剂。Shao 等[120]通过调节金属种类与配比，合成了 Lewis 酸位点丰富且加氢能力适宜的 Co-Fe-Al 合金催化剂用于 PET 氢解，解聚程度接近完全。但该催化剂催化氢解 PET 的机理尚不明晰，H_2 压强高，反应时间与其他催化剂相比不具备优势，还有待进一步研究。Cu 催化剂能抑制 PET 氢解中间体苯环的加氢反应或 EG 的氢解反应，主要产物为二甲苯和 EG[121]。Shao 等[122]合成了 $Cu/Zn\text{-}FeO_x$ 催化剂，其中 Zn 通过形成多孔结构和促进 CuO 的还原，产生了更多 Lewis 酸位点，提高了金属 Cu 的分散程度及稳定性，并形成了吸附 PET 或其衍生物的酸位点或氧空位[123-124]，选择具有亲氧能力和磁性的 Fe_xO_y 作为载体能促进含氧官能团的氢解[125]，并使 $Cu/Zn\text{-}FeO_x$ 催化剂具有磁性，便于

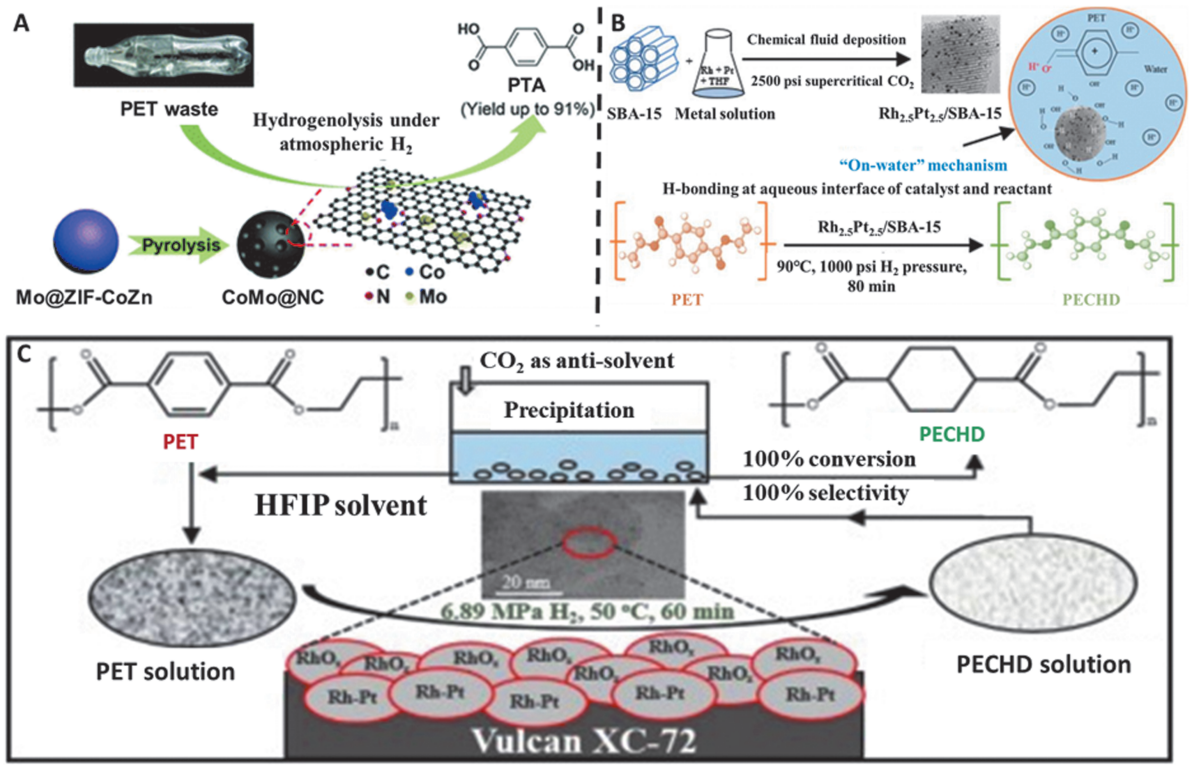


图 9 (A) CoMo@NC 的制备及用于 PET 氢解[136]; (B) $Rh_{2.5}Pt_{2.5}$/SBA-15 的制备及用于 PET 氢解[126]; (C) $Rh_{2.5}Pt_{2.5}$/ Vulcan XC-72 的制备及用于 PET 氢解[137].

Figure 9 (A) Preparation of CoMo@NC and its application in PET hydrogenolysis[136]; (B) Preparation of $Rh_{2.5}Pt_{2.5}$/SBA-15 and its application in PET hydrogenolysis[126]; (C) Preparation of $Rh_{2.5}Pt_{2.5}$/Vulcan XC-72 and its application in PET hydrogenolysis[137].

回收。然而，该催化剂无法保留更多的 EG，也无法将 PET 转化为二甲苯，且 Cu 存在较为明显的烧结问题，Fe_xO_y 与 Zn 的作用机理尚不明晰，需进一步研究。Bhattacharjee 等[126]利用 Rh-Pt 双金属催化剂将 PET 完全转化为可生物降解的环保材料 PECHD (聚酯聚乙烯-1,4 环己二羧酸酯)，该催化剂的协同作用是实现高催化活性的主要机制，其中 Rh 选择性地氢化芳香环，而 Pt 增强 H_2 溢出，以桥接方式帮助 PET 中的芳香环定位到催化剂的活性位点，从而使 PET 中的芳香环暴露于溢出的 H 原子和 Rh 的加氢攻击下[127-129]。研究表明，当 Rh 和 Pt 的负载均为 2.5% 时，催化剂的性能最佳。该课题组采用 CFD (化学流体沉积技术) 合成了 $Rh_{2.5}Pt_{2.5}$/SBA-15 用于 PET 氢解，将 PET 完全转化为 PECHD (图 9(B))。反应中，水作为功能溶剂，其质子可诱导 PET 中的芳香环极化，进一步催化固态 PET 加氢，载体 SBA-15 具有良好的水热稳定性和有序的结构，良好的亲水性保证了催化剂在水中的良好分散。经进一步研究，该课题组改用多元醇法合成 $Rh_{2.5}Pt_{2.5}$/Vulcan XC-72 催化剂，并用 HFIP (1,1,1,3,3,3-六氟-2-丙醇) 将 PET 溶解，进而实现 PET 在更温和的条件下的完全转化，降低了熔化 PET 的能源消耗 (图 9(C))。Rh-Pt 合金与 Vulcan XC-72 表面氧基之间存在强金属负载相互作用，导致缺电子物质 RhO_x 的出现，RhO_x 有效促进了 PET 中芳香环选择性氢化，这是 $Rh_{2.5}Pt_{2.5}$/Vulcan XC-72 具有高催化活性的主要原因。该过程采用压缩 CO_2 反溶剂技术对产物 PECHD 进行有效回收，CO_2 廉价易得且环保，可通过减压从产物中去除，从而实现 HFIP 的回收循环，全面降低了回收成本[130-131]。

表 3 总结了各类多相催化剂在不同条件下氢解 PET 的性能。其中，MOFs 材料有序的结构有利于修饰并负载活性位点，便于机理研究。然而，MOFs 在 PET 氢解方面仍面临单个产物产率较低、与混合产物难以分离的挑战，催化效率仍有待进一步提高。迄今为止，应用于 PET 氢解的 MOFs 主要为 UiO-66 系列，ZIF 系列和 MIL 系列等 MOFs 在该领域的应用尚未见报道，因

表3 多相催化剂性能[a].

Table 3 Performance of heterogeneous catalysts[a].

催化剂	催化剂用量	条件	产物	产率/%
UiO-66[57]	5 mol%	1atm H_2, 260 ℃, 24 h	PTA, MMT	98
MIL-140A[57]	3 mol%	1 atm H_2, 260 ℃, 24 h	PTA, MMT	88
MoO_2/C[68]	40:1[b]	15 atm H_2, 260 ℃, 24 h	PTA	86
MoO_2/C[69]	40%	400 ℃	PTA	70.26
Ru/Nb_2O_5[83]	1:1[c]	2MPa N_2, 15 g, 220 ℃, 12 h, H_2O	BTX	～91.3
Ru/Nb_2O_5[138]	1:1[c]	2.96 atm H_2, 200 ℃, 12 h	PTA	87.1
Ru/TiO_2[85]	192:60[c]	60 bar H_2, 200 ℃, H_2O	环烷烃,烷烃	99.6
Ru/TiO_2[86]	1:1[c]	50 bar H_2, 220 ℃, 12 h	C_6～C_8环烷烃	~90
Ru/TiO_2[95]	50:1[c]	0.3 MPa H_2, 230 ℃, 12 h, 10 mL H_2O	BTX	77
Ru-ReO_x/SiO_2+HZSM-5[41]	3:2[c]	3 MPa H_2, 150 ℃, 10 h, 5 ml H_2O, 15 mL环戊烷	C_6～C_8环烷烃	90
Ru_{SA}-CoAlO[105]	1:12[c]	1.5 bar H_2, 520～300 ℃	C_1～C_4	87.5
Co/TiO_2[94]	—	30 bar H_2, 340℃, 4 h	甲苯,二甲苯	78.9
CoMo@NC[117]	10:3[c]	1 atm H_2, 260 ℃, 10 h	PTA	87%[d]
Co-Fe-Al[120]	4:3[c]	4 MPa, 210℃, 10 h, 4 mL 1,4-二恶烷	PX	>99
$Cu_{1.0}$/$Zn_{2.0}$-FeO_x[122]	4:3[c]	4 MPa, 200℃, 8 h, 4 mL 1,4-二恶烷	PX	98.6
$Rh_{2.5}Pt_{2.5}$/SBA-15[126]	5:1[c]	1000 psi H_2, 90 ℃, 80 min	PECHD	100
$Rh_{2.5}Pt_{2.5}$/Vulcan XC-72[137]	0.05 g[d]	6.89 MPa, 50 ℃, 1 h	PECHD	100

注：a：本表格中的催化反应底物均为PET；b为n_{PET}: n_{Mo}；c为m_{PET}:$m_{催化剂}$；d：反应物质量分数为5 %。

此，这些MOFs在PET氢解中的应用值得进一步深入研究和探索。金属氧化物催化剂结构稳定，回收性能优异，但对H_2的依赖性强，且缺少将PET氢解为高值产品以及氢解混合塑料的研究，氢解产率高于MOFs，但与金属催化剂相比，尚有待提高。金属催化剂能通过调整催化剂的结构与金属配比控制产物，金属与金属、金属与金属氧化物之间存在协同作用，在活化底物方面具有优势，特别是含贵金属 (包括Pt、Pd、Rh和Ru等) 的催化剂具有强大的加氢能力，具有强Brønsted酸位点用于激活C—O或C—C键，促进烷基氢化反应[132-133]，在转化芳香族氧化物方面表现出优异的HDO活性，能克服MOFs和金属氧化物无法氢解混合塑料与获得高值产物的局限。但贵金属成本高，对硫和氮元素敏感[94]，在PET催化氢解中的应用受到限制。非贵金属廉价易得、催化效率高且稳定性好，在无溶剂体系中催化氢解PET极具潜力[134-135]。但若想得到石油衍生的芳烃或其他碳氢化合物，则需升高温度或增大压强，催化效率仍需进一步提高。

为进一步提高PET氢解的催化效率，降低反应所需的温度和压力，得到高附加值产物，设计复合催化剂的串联反应成为有效的策略。Marks等[139]基于均相催化剂$Hf(OTf)_4$的氧亲和性和金属催化剂Pd对氢的活性，制备了$Hf(OTf)_4$和Pd/C串联催化剂。该催化剂体系在温和条件下氢解PET得到了较高的PTA和C_2H_6收率。近年来，甲醇、2-丙醇和EG等可再生低碳醇作为供氢体被广泛应用于H转移反应中[140]，利用低碳醇对PET加氢脱氧获得汽油燃料和防冻材料的研究备受关注。Tang等[141]采用3步串联反应，包括废弃PET无催化醇解、Pt/C催化剂上的无溶剂加氢和双金属Ru-Cu/SiO_2催化剂上的HDO，实现了PET生产C_7～C_8环烷烃和芳烃的高收率(95%)。Gao等[142]以甲醇为溶剂和供氢体 (甲醇在210 ℃下分解产生H_2)，在改性Cu/SiO_2催化剂上以较低的成本将PET转化为PX和EG，该过程包括PET甲醇解和DMT (二甲基对苯二酸酯) 选择性还原。Liu等[143]以甲醇为溶剂和供氢

体在Pt/TiO_2上将PET选择性升级为BTX，该过程包括甲醇重整、PET甲醇解和原位加氢脱氧，产率达77.96%，为富氧废弃塑料H转移催化升级奠定了基础。Cheng等[144]提出在Cu/ZrO_2的催化下，通过甲醇解和DMT加氢2步工艺将PET废弃物转化为高值精细化学品MMB (对苯甲酸甲酯)。该研究揭示了催化剂晶型对反应选择性的影响，相较于其他晶型，$m\text{-}ZrO_2$对DMT的吸附能力弱，能避免对DMT深度裂解，对产品MMB具有高选择性。复合催化剂的串联反应策略可在温和条件下高效地将废弃塑料转化为有价值的化学品原料[145]，克服了单一催化剂类型和反应类型的局限，使用内源氢代替存在安全隐患的H_2，在PET氢解工业上具有更广泛的研究前景。

4 总结与展望

PET催化氢解技术能将废弃塑料转化为有价值的化工原料，对环境和工业的可持续发展具有重要价值。目前，PET的生产与消费主要呈现为不可持续的降级回收线性经济模式。一方面，废弃PET的回收率不高，环境污染和高碳排放带来的挑战不容忽视；另一方面，回收PET的处理与升级回收技术仍需更加高效的工业催化材料和更加完善的循环经济模式。近年来，生物质和酯类化合物的催化氢解技术快速发展，其共性的化学机理在PET氢解的研究中受到关注。与传统的工业降解技术相比，以金属配合物为基础的均相催化剂在催化活性和选择性上具有竞争力，而多相催化剂则在催化活性、稳定性、分离回收等方面具有更进一步的优势。通过对催化机理的研究与对催化剂的系统设计，发现新型串联催化剂拓展了氢解反应的产物类型和潜在应用领域。未来的研究将以催化机理和关键材料为突破口，对氢解反应的工艺过程进行优化，并通过温和工况下高选择性、高附加值产物的氢解工艺设计，实现具有良好经济和环境效益的PET全生命周期循环技术的创新和发展。

参考文献

1 Fagnani D E, Tami J L, Copley G, et al. 100th Anniversary of macromolecular science viewpoint: Redefining sustainable polymers [J]. *ACS Macro Letters*, **2021**, 10: 41-53.

2 Bohre A, Jadhao P R, Tripathi K, et al. Chemical recycling processes of waste polyethylene terephthalate using solid catalysts [J]. *ChemSusChem*, **2023**, 16: e202300142.

3 Smith R L, Takkellapati S, Riegerix R C. Recycling of plastics in the United States: Plastic material flows and polyethylene terephthalate (PET) recycling processes [J]. *ACS Sustain Chem Eng*, **2022**, 10: 2084-2096.

4 Berlino M, Mangano M C, Vittor C D, et al. Effects of microplastics on the functional traits of aquatic benthic organisms: A global-scale meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, **2021**, 285: 117174.

5 Lamberti F M, Román-Ramírez L A, Wood J. Recycling of bioplastics: Routes and benefits [J]. *Journal of Polymers and the Environment*, **2020**, 28: 2551-2571.

6 Barboza L G A, Vethaak A D, Lavorante B R B O, et al. Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health [J]. *Marine Pollution Bulletin*, **2018**, 133: 336-348.

7 Jambeck J R, Geyer R, Wilcox C, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean [J]. *Science*, **2015**, 347(6223): 768-771.

8 Wang J, Yuan X, Deng S, et al. Waste polyethylene terephthalate (PET) plastics-derived activated carbon for CO_2 capture: A route to a closed carbon loop [J]. *Green Chemistry*, **2020**, 22: 6836-6845.

9 Kawai F, Kawabata T, Oda M. Current state and perspectives related to the polyethylene terephthalate hydrolases available for biorecycling [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **2020**, 8: 8894-8908.

10 Sarda P, Hanan J C, Lawrence J G, et al. Sustainability performance of polyethylene terephthalate, clarifying challenges and opportunities [J]. *Journal of Polymer Science*, **2022**, 60(1): 7-31.

11 Arias J J R, Thielemans W. Instantaneous hydrolysis of PET bottles: An efficient pathway for the chemical recycling of condensation polymers [J]. *Green Chemistry*, **2021**, 23: 9945-9956.

12 Kang M J, Kim H T, Lee M W, et al. A chemo-microbial hybrid process for the production of 2-pyrone-4, 6-dicarboxylic acid as a promising bioplastic monomer from PET waste [J]. *Green Chemistry*, **2020**, 22: 3461-3469.

13 Ghasemi M H, Neekzad N, Ajdari F B, et al. Mechanistic aspects of poly(ethylene terephthalate) recycling-toward enabling high quality sustainability decisions in waste management [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, **2021**, 28: 43074-43101.
14 Singh A, Rorrer N A, Nicholson S R, et al. Techno-economic, life-cycle, and socioeconomic impact analysis of enzymatic recycling of poly(ethylene terephthalate) [J]. *Joule*, **2021**, 5: 2479-2503.
15 Chen L, Pelton R E O, Smith T M. Comparative life cycle assessment of fossil and bio-based polyethylene terephthalate (PET) bottles [J]. *Journal of Cleaner Production*, **2016**, 137: 667-676.
16 Geyer R, Jambeck J R, Law K L. Production, use, and fate of all plastics ever made [J]. *Science Advances*, **2017**, 3(7): e1700782.
17 Benavides P T, Dunn J B, Han J, et al. Exploring comparative energy and environmental benefits of virgin, recycled, and bio-derived PET bottles [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **2018**, 6: 9725-9733.
18 Ioakeimidis C, Fotopoulou K N, Karapanagioti H K, et al. The degradation potential of PET bottles in the marine environment: An ATR-FTIR based approach [J]. *Sci Rep*, **2016**, 6: 23501.
19 Group C W. The new plastics economy: Catalysing action [J]. *Chemical Weekly*, **2017**(30): 62.
20 Ellen MacArthur Foundation. The new plastics economy: Rethinking the future of plastics [R]. *Davos: World Economic Forum*, **2016**.
21 Roy P S, Garnier G G, Allais F F, et al. Strategic approach towards plastic waste valorization: Challenges and promising phemical upcycling possibilities [J]. *ChemSusChem*, **2021**, 14: 4007-4027.
22 Chen H, Wan K, Zhang Y, et al. Waste to wealth: Chemical recycling and chemical upcycling of waste plastics for a great future[J]. *ChemSusChem*, **2021**, 14: 4123-4136.
23 Vollmer I, Jenks M J F, Roelands M C P, et al. Beyond mechanical recycling: Giving new life to plastic waste [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, **2020**, 59: 15402-15423.
24 Martín A J, Mondelli C, Jaydev S D, et al. Catalytic processing of plastic waste on the rise[J]. *Chem*, **2021**, 7: 1487-1533.
25 Sang T, Wallis C J D, Hill G, et al. Polyethylene terephthalate degradation under natural and accelerated weathering[J]. *Onditions*, **2020**, 136: 109873.
26 Zhang F, Zhao Y, Wang Y, et al. Current technologies for plastic waste treatment: A review [J]. *Journal of Cleaner Production*, **2021**, 282: 124523.
27 Garcia J M, Robertson M L. The future of plastics recycling. [J]. *Science*, **2017**, 358: 870-872
28 Rahimi A, García J M. Chemical recycling of waste plastics for new materials production [J]. *Nature Reviews Chemistry*, **2017**, 1: 0046.
29 Guo Z, Yan N, Lapkin A A. Towards circular economy: Integration of bio-waste into chemical supply chain[J]. *Current Opinion in Chemical Engineering*, **2019**, 26: 148-156.
30 Al-Salem S M, Lettieri P, Baeyens J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review [J]. *Waste Management*, **2009**, 29: 2625-2643.
31 Ragaert K, Delva L, Geem K V. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste [J]. *Waste Management*, **2017**, 69: 24-58.
32 Predel M, Kaminsky W. Pyrolysis of mixed polyolefins in a fluidised-bed reactor and on a pyro-GC/MS to yield aliphatic waxes [J]. *Polymer Degradation and Stability*, **2000**, 70: 373-385.
33 Munir D, Irfan M F, Usman M R. Hydrocracking of virgin and waste plastics: A detailed review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **2018**, 90: 490-515.
34 Gomes T S Visconte L L Y, Pacheco E B A V. Life cycle assessment of polyethylene terephthalate packaging: An overview[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, **2019**, 27: 533-548.
35 Nakatani J, Fujii M, Moriguchi Y, et al. Life-cycle assessment of domestic and transboundary recycling of post-consumer PET bottles [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **2010**, 15: 590-597.
36 Mark L O, Cendejas M C, Hermans I. The use of heterogeneous catalysis in the chemical valorization of plastic waste [J]. *ChemSusChem*, **2020**, 13: 5808-5836.
37 Britt P F, Coates G W, Winey K I, et al. Report of the basic energy sciences roundtable on chemical upcycling of polymers [R]. *United States: Medium: ED*, **2019**.

38 Atta A M, Abdel-Raouf M E, Elsaeed S M, et al. Curable resins based on recycled poly(ethylene terephthalate) for coating applications [J]. *Progress in Organic Coatings*, **2006**, 55: 50-59.

39 Tawfik M E, Ahmed N M, Eskander S B. Aminolysis of poly(ethylene terephthalate) wastes based on sunlight and utilization of the end product [bis(2-hydroxyethylene)terephthalamide] as an ingredient in the anticorrosive paints for the protection of steel structures [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, **2011**, 120: 2842-2855.

40 Pingale N D, Shukla S R. Microwave-assisted aminolytic depolymerization of PET waste [J]. *European Polymer Journal*, **2009**, 45: 2695-2700.

41 Wei J, Zhu M, Liu B, et al. Hydrodeoxygenation of oxygen-containing aromatic plastic wastes to liquid organic hydrogen carriers [J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, **2023**, 62: e202310505.

42 Balaraman E, Gnanaprakasam B, Shimon L J W, et al. Direct hydrogenation of amides to alcohols and amines under mild conditions [J]. *Journal of the American Chemical Society*, **2010**, 132: 16756-16758.

43 Lee K, Jing Y, Wang Y, et al. A unified view on catalytic conversion of biomass and waste plastics [J]. *Nat Rev Chem*, **2022**, 6: 635-652.

44 Goto M K, Kodama H, Hirose A, et al. Depolymerization of polyethylene terephthalate in supercriticalmethanol [J]. *Phys.: Condens. Matter*, **2002**, 14: 11427−11430.

45 Genta M I, Sasaki T, Goto M, et al. Depolymerization mechanism of poly(ethylene terephthalate) insupercritical methanol [J]. *Ind. Eng. Chem. Res*, **2005**, 44: 3894−3900.

46 Shojaei B, Abtahi M, Najafi M. Chemical recycling of PET: A stepping-stone toward sustainability. [J]. *Polymers for Advanced Technologies*, **2020**, 31: 2912-2938.

47 Krall E M, Klein T W, Andersen R J, et al. Controlled hydrogenative depolymerization of polyesters and polycarbonates catalyzed by ruthenium(II)PNN pincer complexes [J]. *Chem Commun* (*Camb*), **2014**, 50: 4884-4887.

48 Ito M, Ootsuka T, Watari R, et al. Catalytic hydrogenation of carboxamides and esters by well-defined Cp*Ru complexes bearing a protic amine ligand [J]. *J Am Chem Soc*, **2011**, 133: 4240-4242.

49 Ito M, Ikariya T. Catalytic hydrogenation of polar organic functionalities based on Ru-mediated heterolytic dihydrogen cleavage [J]. *Chemical Communications*, **2007**: 5134-5142.

50 Zhang J, Leitus G, Ben-David Y, et al. Efficient homogeneous catalytic hydrogenation of esters to alcohols [J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, **2006**, 45: 1113-1115.

51 Balaraman E, Fogler E, Milstein D. Efficient hydrogenation of biomass-derived cyclic di-esters to 1,2-diols[J]. *Chem Commun* (*Camb*), **2012**, 48: 1111-1113.

52 Westhues S J I, Klankermayer J. Molecular catalyst systems as key enablers for tailored polyesters and polycarbonate recycling concepts. [J]. *Science Advance*, **2018**, 4: 8.

53 Ito T O M, Watari R, Shiibashi A, et al. Catalytic hydrogenation of carboxamides and esters by well-defined Cp*Ru complexes bearing a protic amine ligand. [J]. *J Am Chem Soc*, **2011**, 133: 4240-4242.

54 Sharuddin S D A, 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.

55 Bavykina A, Kolobov N, Khan I S, et al. Metal-Organic frameworks in heterogeneous catalysis: Recent progress, new trends, and future perspectives. [J]. *Chemical Reviews*, **2020**, 120: 8468-8535.

56 Mochizuki S, Kitao T, Uemura T. Controlled polymerizations using metal-organic frameworks. [J]. *Chem Commun* (*Camb*), **2018**, 54: 11843-11856.

57 Wei J, Zhu M, Liu B, et al. Hydrodeoxygenation of oxygen-containing aromatic plastic wastes to lquid organic hydrogen carriers [J]. *Angewandte Chemie* (*International ed. in English*), **2023**, 62(46): e202310505.

58 Lobbert L, Chheda S, Zheng J, et al. Influence of 1-butene adsorption on the dimerization activity of single metal cations on UiO-66 nodes [J]. *J Am Chem Soc*, **2023**, 145: 1407-1422.

59 Jiao L, Jiang H L. Metal-organic-framework-based single-atom catalysts for energy applications [J]. *Chem*, **2019**, 5: 786-804.

60 Jing Y, Dong L, Guo Y, et al. Chemicals from lignin: A review of catalytic conversion involving hydrogen [J]. *Chem Sus Chem*, **2020**, 13: 4181-4198.

61 Kim S, Kwon E E, Kim Y T, et al. Recent advances in hydrodeoxygenation of biomass-derived oxygenates over

heterogeneous catalysts [J]. *Green Chemistry*, **2019**, 21: 3715-3743.

62 Du S, Valla J A, Parnas R S, et al. Conversion of polyethylene terephthalate based waste carpet to benzene-rich Oils through thermal, catalytic, and catalytic steam pyrolysis [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **2016**, 4: 2852-2860.

63 Diaz-Silvarrey L S, McMahon A, Phan A N. Benzoic acid recovery via waste poly(ethylene terephthalate) (PET) catalytic pyrolysis using sulphated zirconia catalyst [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **2018**, 134: 621-631.

64 Kumagai S, Yamasaki R, Kameda T, et al. Catalytic pyrolysis of poly(ethylene terephthalate) in the presence of metal oxides for aromatic hydrocarbon recovery using tandem μ-Reactor-GC/MS [J]. *Energy & Fuels*, **2020**, 34: 2492-2500.

65 Mouat A R, Lohr T L, Wegener E C, et al. Reactivity of a carbon-supported single-site molybdenum dioxo catalyst for biodiesel synthesis [J]. *ACS Catalysis*, **2016**, 6: 6762-6769.

66 Xiao L P, Wang L, Li H, et al. Catalytic hydrogenolysis of lignins into phenolic compounds over carbon nanotube supported molybdenum oxide [J]. *ACS Catalysis*, **2017**, 7: 7535-7542.

67 Junhong F J D, Si R, Sun K J, et al. Synergistic effects for enhanced catalysis in a dual single-atom catalyst [J]. *ACS Catalysis*, **2021**, 11(4): 1952-1961.

68 Kratish Y, Li J, Liu S, et al. Polyethylene terephthalate deconstruction catalyzed by a carbon-supported single-site molybdenum-dioxo complex [J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, **2020**, 59: 19857-19861.

69 Liu J, Li Y, Jia X, et al. Catalytic pyrolysis of poly(ethylene terephthalate) with molybdenum oxides for the production of olefins and terephthalic acid [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **2022**, 61: 5054-5065.

70 Zhang J, Yan N. NiAg catalysts for selective hydrogenolysis of the lignin C-O bond [J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, **2016**, 33: 610-619.

71 Zhang J, Sun J, Wang Y. Recent advances in the selective catalytic hydrodeoxygenation of lignin-derived oxygenates to arenes [J]. *Green Chemistry*, **2020**, 22: 1072-1098.

72 Chiu C C, Genest A, BorgnaA, et al. Hydrodeoxygenation of guaiacol over Ru(0001): A DFT study. [J]. *ACS Catalysis*, **2014**, 4: 4178-4188.

73 Shi D, Arroyo-Ramírez L, Vohs J M. The use of bimetallics to control the selectivity for the upgrading of lignin-derived oxygenates: Reaction of anisole on Pt and PtZn catalysts [J]. *Journal of Catalysis*, **2016**, 340: 219-226.

74 Crespos C, Collins M A, Pijper E, et al. Multi-dimensional potential energy surface determination by modified shepard interpolation for a molecule-surface reaction: H_2+Pt(111) [J]. *Chemical Physics Letters*, **2003**, 376: 566-575.

75 Ma D, Lu S, Liu X, et al. Depolymerization and hydrodeoxygenation of lignin to aromatic hydrocarbons with a Ru catalyst on a variety of Nb-based supports [J]. *Chinese Journal of Catalysis*, **2019**, 40: 609-617.

76 Yang F, Liu D, Zhao Y, et al. Size dependence of vapor phase hydrodeoxygenation of m-Cresol on Ni/SiO_2 catalysts [J]. *ACS Catalysis*, **2018**, 8: 1672-1682.

77 Dong L, Lin L, Han X, et al. Breaking the limit of lignin monomer production via cleavage of interunit carbon-carbon linkages [J]. *Chem*, **2019**, 5: 1521-1536.

78 Shao Y, Xia Q, Dong L, et al. Selective production of arenes via direct lignin upgrading over a niobium-based catalyst [J]. *Nature Communications*, **2017**, 8(1): 16104.

79 Sanyal U, Song Y, Singh N, et al. Structure sensitivity in hydrogenation reactions on Pt/C in aqueous-phase [J]. *ChemCatChem*, **2018**, 11: 575-582.

80 Xia Q N, Cuan Q, Liu X H, et al. Pd/$NbOPO_4$ multifunctional catalyst for the direct production of liquid alkanes from aldol adducts of furans [J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, **2014**, 53: 9755-9760.

81 Shao Y, Xia Q, Dong L, et al. Selective production of arenes via direct lignin upgrading over a niobium-based catalyst [J]. *Nat Commun*, **2017**, 8: 16104.

82 Xia Q, Chen Z, Shao Y, et al. Direct hydrodeoxygenation of raw woody biomass into liquid alkanes [J]. *Nat Commun*, **2016**, 7: 11162.

83 Lu S, Jing Y, Feng B, et al. H (2)-free plastic conversion: Converting PET back to BTX by unlocking hidden

hydrogen. [J]. *ChemSusChem*, **2021**, 14: 4242-4250.

84 Jing Y, Wang Y, Furukawa S, et al. Towards the circular economy: Converting aromatic plastic waste back to arenes over a Ru/Nb_2O_5 catalyst [J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, **2021**, 60: 5527-5535.

85 Li R, Zeng W, Zhao R, et al. TiO_2 nanoparticle supported Ru catalyst for chemical upcycling of polyethylene terephthalate to alkanes [J]. *Nano Research*, **2023**, 16: 12223-12229.

86 Murali V, Kim J R, Park Y K, et al. Water-assisted single-step catalytic hydrodeoxygenation of polyethylene terephthalate into gasoline- and jet fuel-range cycloalkanes over supported Ru catalysts in a biphasic system [J]. *Green Chemistry*, **2023**, 25: 8570-8583.

87 Zhang J, Gao M, Wang R, et al. Switching of CO_2 hydrogenation selectivity via chlorine poisoning over Ru/TiO_2 catalyst [J]. *Nano Research*, **2023**, 16: 4786-4792.

88 Valdés-Martínez O U, Díaz de León J N, Santolalla C E, et al. Fundamental study of catalytic functionalities involved in effective C-O cleavage over ru-supported catalysts [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **2021**, 60: 18880-18890.

89 Liu X, Jia W, Xu G, et al. Selective hydrodeoxygenation of lignin-derived phenols to cyclohexanols over *co*-based catalysts [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **2017**, 5: 8594-8601.

90 Oi L E, Choo M Y, Lee H V, et al. Recent advances of titanium dioxide (TiO_2) for green organic synthesis [J]. *RSC Advances*, **2016**, 6: 108741-108754.

91 Yang Y, Hao J, Lv G. Comparative study of catalytic hydrodeoxygenation performance over SBA-15 and TiO_2 supported 20 wt% Ni for bio-oil upgrading [J]. *Fuel*, **2019**, 253: 630-636.

92 Héroguel F, Nguyen X T, Luterbacher J S. Catalyst support and solvent effects during lignin depolymerization and hydrodeoxygenation [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **2019**, 7: 16952-16958.

93 Lu M, Du H, Wei B, et al. Catalytic hydrodeoxygenation of guaiacol over palladium catalyst on different titania supports [J]. *Energy & Fuels*, **2017**, 31: 10858-10865.

94 Hongkailers S, Jing Y, Wang Y, et al. Recovery of arenes from polyethylene terephthalate (PET) over a Co/TiO_2 catalyst [J]. *ChemSusChem*,**2021**, 14 (19): 4330-4339.

95 Ye M, Li Y, Yang Z, et al. Ruthenium/TiO_2-catalyzed hydrogenolysis of polyethylene terephthalate: Reaction pathways dominated by coordination environment [J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, **2023**, 62: e202301024.

96 Li R, Wang D. Understanding the structure-performance relationship of active sites at atomic scale [J]. *Nano Research*, **2022**, 15: 6888-6923.

97 Zheng X, Li B, Wang Q, et al. Emerging low-nuclearity supported metal catalysts with atomic level precision for efficient heterogeneous catalysis [J]. *Nano Research*, **2022**, 15: 7806-7839.

98 Han A, Sun W, Wan X, et al. Construction of Co4 atomic clusters to enable Fe−N4 motifs with highly active and durable oxygen reduction performance [J]. **2023**, 62: e202303185.

99 Gan T, Wang D. Atomically dispersed materials: Ideal catalysts in atomic era [J]. *Nano Research*, **2024**, 17: 18-38.

100 Ji S, Chen Y, Wang X, et al. chemical synthesis of single atomic site catalysts [J]. *Chemical Reviews*, **2020**, 120: 11900-11955.

101 Wang A, Li J, Zhang T. Heterogeneous single-atom catalysis [J]. *Nature Reviews Chemistry*, **2018**, 2: 65-81.

102 Gan T, Y J, Morris D, et al. Electron donation of non-oxide supports boosts O_2 activation on nano-platinum catalysts [J]. *Nature Communications*, **2021**, 12: 2741.

103 Zhu P, Xiong X, Wang D. Regulations of active moiety in single atom catalysts for electrochemical hydrogen evolution reaction [J]. *Nano Research*, **2022**, 15: 5792-5815.

104 Zhang Z,Zhu J,Chen S, et al. Liquid fluxional Ga single atom catalysts for efficient electrochemical CO_2 reduction [J]. *Angewandte Chemie*, **2022**, 135(3): 1-8.

105 Zhang Z,Wang J,Ge X, et al. Mixed plastics wastes upcycling with high-stability single-atom Ru catalyst [J]. *J Am Chem Soc*,**2023**, 145: 22836-22844.

106 Qiu C,Odarchenko Y,Lezcano-Gonzalez I, et al. Visualising Co nanoparticle aggregation and encapsulation in Co/TiO_2 catalysts and its mitigation through surfactant residues [J]. *Journal of Catalysis*,**2023**, 419: 58-67.

107 Takeda Y,Tamura M,Nakagawa Y, et al. Characterization of $Re\text{-}Pd/SiO_2$ catalysts for hydrogenation of stearic acid [J]. *ACS Catalysis*,**2015**, 5: 7034-7047.

108 Robinson A M, Hensley J E, Medlin J W. Bifunctional catalysts for upgrading of biomass-derived oxygenates: A review [J]. *ACS Catalysis*, **2016**, 6: 5026-5043.

109 Wu G, Zhang N, Dai W, et al. Construction of bifunctional Co/H-ZSM-5 catalysts for the hydrodeoxygenation of stearic acid to diesel-range alkanes [J]. *ChemSusChem*, **2018**, 11: 2179-2188.

110 Yan N, Ding S. Chemical breakthrough converts cellulose into ethanol [J]. *Trends in Chemistry*,**2019**, 1: 457-458.

111 Zhong J, Pérez-Ramírez J, Yan N. Biomass valorisation over polyoxometalate-based catalysts [J]. *Green Chemistry*, **2021**, 23: 18-36.

112 Do P T M, Foster A J, Chen J, et al. Bimetallic effects in the hydrodeoxygenation of meta-cresol on γ-Al_2O_3 supported Pt-Ni and Pt-Co catalysts [J]. *Green Chemistry*,**2012**, 14: 1388-1397.

113 Shu R, Li R, Liu Y, et al. Enhanced adsorption properties of bimetallic RuCo catalyst for the hydrodeoxygenation of phenolic compounds and raw lignin-oil [J]. *Chemical Engineering Science*, **2020**, 227: 115920.

114 Tran N T T, Uemura Y, Ramli A, et al. Vapor-phase hydrodeoxygenation of lignin-derived bio-oil over Al-MCM-41 supported Pd-Co and Pd-Fe catalysts [J]. *Molecular Catalysis*, **2022**, 523: 111435.

115 Hanaor H A D, Sorrell C C. Review of the anatase to rutile phase transformation [J]. *Journal of Materials Science*, **2011**, 46(4): 855-874.

116 Ooi X Y, Oi L E, Choo M Y, et al. Efficient deoxygenation of triglycerides to hydrocarbon-biofuel over mesoporous Al_2O_3-TiO_2 catalyst [J]. *Fuel Processing Technology*, **2019**, 194: 106120.

117 Wu P, Lu G, Cai C. Cobalt-molybdenum synergistic catalysis for the hydrogenolysis of terephthalate-based polyesters [J]. *Green Chemistry*, **2021**, 23: 8666-8672.

118 Jia W, Xu G, Liu X, et al. Direct selective hydrogenation of fatty acids and jatropha oil to fatty alcohols over cobalt-based catalysts in water [J]. *Energy & Fuels*, **2018**, 32: 8438-8446.

119 Zhao H, Jiang Y, Liu H, et al. Direct synthesis of allyl alcohol from glycerol over CoFe alloy [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, **2020**, 277: 119187.

120 Shao Y, Fan M, Sun K, et al. The quantitative conversion of polyethylene terephthalate (PET) and Coca-Cola bottles to p-xylene over Co-based catalysts with tailored activities for deoxygenation and hydrogenation [J]. *Green Chemistry*, **2023**, 25: 10513-10529.

121 Shao Y, Sun K, Fan M, et al. Synthesis of a thermally and hydrothermally stable copper-based catalyst via alloying of Cu with Ni and Zn for catalyzing conversion of furfural into cyclopentanone [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **2022**, 10: 8763-8777.

122 Shao Y, Kong L, Fan M, et al. Synergy between Cu and lewis acidic sites in Cu/Zn-FeO_x catalysts for the selective conversion of poly(ethylene terephthalate) waste to p-Xylene and ethylene glycol [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **2024**, 12: 3818-3830.

123 Cheng Z, Zhou W, Lan G, et al. High-performance Cu/ZnO/Al_2O_3 catalysts for methanol steam reforming with enhanced Cu-ZnO synergy effect via magnesium assisted strategy [J]. *Journal of Energy Chemistry*, **2021**, 63: 550-557.

124 Gallegos M V, Reimers W G, Luna C R, et al. Theoretical analysis of polyethylene terephthalate (PET) adsorption on Co and Mn-doped ZnO (000-1) [J]. *Molecular Catalysis*, **2022**, 531: 112688.

125 Shao Y, Wu J, Zheng Z, et al. Alloying cobalt in Co-Fe-Al catalyst for achieving the selective conversion of furfural to cyclopentanone [J]. *Renewable Energy*, **2022**, 195: 957-971.

126 Lende A. B., Bhattacharjee S. and Tan C. -S. On-water hydrogenation of polyethylene terephthalate to environmentally friendly polyester by the catalyst $Rh_{2.5}Pt_{2.5}$/SBA-15[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **2021**, 9(21): 7224-7234.

127 Cui J, Tan J, Zhu Y, et al. Aqueous hydrogenation of levulinic acid to 1, 4-pentanediol over Mo-modified Ru/activated carbon catalyst [J]. *ChemSusChem*,**2018**, 11: 1316-1320.

128 Pan H B, Wai C M. Facile sonochemical synthesis of carbon nanotube-supported bimetallic Pt-Rh nanoparticles for room temperature hydrogenation of arenes [J]. *New Journal of Chemistry*, **2011**, 35: 1649-1660.

129 Park J Y, Zhang Y, Joo S H, et al. Size effect of RhPt bimetallic nanoparticles in catalytic activity of CO oxidation: Role of surface segregation [J]. *Catalysis Today*, **2012**, 181: 133-137.

130 Sarkari M, Darrat I, Knutson B L. Generation of microparticles using CO_2 and CO_2-philic antisolvents [J]. *AIChE*

Journal, **2000**, 46: 1850-1859.
131 Yu W, Hsu Y P, Tan C S. Synthesis of rhodium-platinum bimetallic catalysts supported on SBA-15 by chemical fluid deposition for the hydrogenation of terephthalic acid in water [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, **2016**, 196: 185-192.
132 Shu R, Lin B, Wang C, et al. Upgrading phenolic compounds and bio-oil through hydrodeoxygenation using highly dispersed Pt/TiO_2 catalyst [J]. *Fuel*, **2019**, 239: 1083-1090.
133 Zhao C, Lercher J A. Selective hydrodeoxygenation of lignin-derived phenolic monomers and dimers to cycloalkanes on Pd/C and HZSM-5 catalysts [J].*ChemCatChem*, **2012**, 4: 64-68.
134 Cheng C, Li P, Yu W, et al. Nonprecious metal/bimetallic catalytic hydrogenolysis of lignin in a mixed-solvent system [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **2020**, 8: 16217-16228.
135 Feng Y, Long S, Tang X, et al. Earth-abundant 3d-transition-metal catalysts for lignocellulosic biomass conversion[J]. *Chem Soc Rev*, **2021**, 50: 6042-6093.
136 Wu P., Lu G. and Cai C. Cobalt-molybdenum synergistic catalysis for the hydrogenolysis of terephthalate-based polyesters[J]. *Green Chemistry*, **2021**, 23(21): 8666-8672
137 Lende A B, Bhattacharjee S, Tan C S. Hydrogenation of polyethylene terephthalate to environmentally friendly polyester over vulcan XC-72 carbon supported Rh-Pt bimetallic catalyst [J]. *Catalysis Today*, **2022**, 388: 117-124.
138 Jing Y, Wang Y, Furukawa S, et al. Towards the circular economy: Converting aromatic plastic waste back to arenes over a Ru/Nb_2O_5 catalyst [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, **2021**, 60: 5527-5535.
139 Kratish Y, Marks T J. Efficient polyester hydrogenolytic deconstruction via tandem catalysis [J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, **2022**, 61: e202112576.
140 Tang C W, Chen Y J, Yeh C T, et al. Reforming of methanol to produce hydrogen over the Au/ZnO catalyst [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, **2021**, 46: 80-88.
141 Tang H, Li N, Li G, et al. Synthesis of gasoline and jet fuel range cycloalkanes and aromatics from poly(ethylene terephthalate) waste [J]. *Green Chemistry*, **2019**, 21: 2709-2719.
142 Gao Z,Ma B,Chen S, et al. Converting waste PET plastics into automobile fuels and antifreeze components [J]. *Nature Communications*, **2022**, 13: 3343.
143 Liu H, Zhang J, Gu J, et al. Mechanistic insight into the hydrogen transfer pathway for selective upcycling of PET to arenes. [J]. *Journal of Cleaner Production*, **2023**, 425: 138924.
144 Cheng J, Xie J, Xi Y, et al. Selective upcycling of polyethylene terephthalate towards high-valued oxygenated chemical methyl p-methyl benzoate using a Cu/ZrO_2 catalyst [J]. *Angewandte Chemie*, **2024**, 63: e202319896.
145 Vollmer I, Jenks M J F, Mayorga González R, et al. Plastic waste conversion over a refinery waste catalyst [J]. *Angewandte Chemie*, **2021**, 60: 16101-16108.

Review

Catalysts for Hydrogenesis of PET Waste

ZOU Yu-chong[1], CHEN Wei-peng[1], MAI Yao-shun[1], WANG Wei[1], XIA Yong[2*], ZHOU Xin[1*]
([1]*South China University of Technology, Guangzhou 510640, China*; [2]*Phelix New Materials Limited Liability Company, Shanghai 201507, China*)

Abstract As one of the largest consumed plastics in the world, PET (polyethylene terephthalate) is widely used in food packaging, beverage bottles, textiles, construction and other fields. However, the continuous increase in PET waste emissions also poses problems for sustainable environmental development. Compared with technologies such as incineration or degrading PET into CO_2, catalytic hydrogenolysis technology which depolymerizes it into high-value chemical raw materials, has received much attention in recent years. This technology can bring economic benefits while realizing waste recycling. Currently, the catalytic hydrogenolysis technology has not been put into industrial use, and the main challenges come from the catalytic performance and preparation cost of key catalytic materials. Therefore, the development of low-cost and high-performance catalysts is the key to the

industrial application of this technology. This article summarizes the research progress of PET catalytic hydrogenolysis, catalyst design strategies with practical application potential, and points out the possible development direction of PET high-efficiency catalytic hydrogenolysis technology in the future. It is believed that this paper is of great significance for promoting its development and industrial application.

Keywords Catalytic hydrogenolysis, PET, Catalysts, Waste recycling

* **Corresponding author:** ZHOU Xin, E-mail: xinzhou@scut.edu.cn; XIA Yong, E-mail: mxia@phelix.cn.