

---

# 化学回收打破塑料循环“魔咒”

作者：writer 来源：爱科学

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/15330.html>

*本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！*

化学回收打破塑料循环“魔咒”。台风烟花过后，大量白色垃圾被海洋吐在了上海的江堤上，成堆的塑料泡沫、塑料袋、矿泉水瓶……让原本美丽的滨江森林公园一夜之间沦为垃圾场。

据统计，全球每年约有480万~1270万吨塑料被排放到海洋，并随着洋流扩散到世界各地，有的还会沉到海底最深处，甚至是马里亚纳海沟。

面对这一全球污染危机，开发新方法实现塑料回收和升级再造，成为当下研究热点。近日，国内外几个重磅进展的接连发布，为塑料循环经济带来曙光。

8月13日，美国康奈尔大学高分子化学家Geoffrey W. Coates课题组在《科学》发文，他们以溴化铟为催化剂，将聚缩醛塑料定量转化为单体，实现了塑料的闭环回收。

8月18日，清华大学化学系副教授段昊泓课题组在《自然—通讯》发文，他们使用储量丰富的金属基催化剂，将生活中常见的聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）塑料，升级转化为价值更高的化学材料和氢燃料。

多项研究表明，在催化技术的推动下，化学回收有望打破塑料循环魔咒，让数以亿吨的白色垃圾变废为宝。

## 塑料回收 催化有方

塑料是以单体为原料，通过加聚或缩聚反应聚合而成的高分子化合物。中国科学院长春应用化学研究所研究员王献红告诉《中国科学报》，目前废弃塑料的处理方式主要是焚烧、填埋，只有极少部分（低于10%）采用回收后物理或化学处理。物理处理只能以牺牲产品性能为代价降级使用，而绝大多数化学处理效率则很低，缺乏大规模应用的竞争力。

王献红对记者表示，为解决废弃塑料的再利用问题，一个新的概念迅速得到全世界高分子科学界的关注，该方法通过设计特定的单体合成高分子材料，再将其直接转化为原单体，从而实现资源循环和同级使用。

Coates课题组采用的就是这种方法。在论文中，他们提出了一种可逆钝化阳离子开环聚合策略，以溴化铟为催化剂、卤代甲基醚为引发剂，在质子捕捉剂（大位阻有机碱）下，成功得到分子量高达22万的聚缩醛，其力学性能媲美商业化聚烯烃，且具有高达98%的单体（1,3-二氧环戊烷）回收率。

---

聚缩醛通常采用阳离子聚合方法得到，但是分子量较低（<2万），因此聚缩醛的力学性能很差，无法实际应用。Coates课题组能够将高分子量聚缩醛定量转化为单体，为废弃塑料的化学利用带来了曙光。王献红评价道。

对于塑料的化学回收，除了直接转化回单体，还可以将其升级再造，段昊泓课题组采取的路径就是后者。他们使用地球储量丰富的镍基和钴基催化剂，实现了高效升级回收高产物选择性，使得产物容易分离。经过电解和产物分离，PET塑料在室温下就可转化为价值更高的产品，如二甲酸钾（常用于饲料）以及氢燃料。

从化学的角度，PET是一种聚酯塑料，很容易通过水解得到它的单体，但是单体的分离需要很高的成本，这是限制其产业化的主要原因。论文第一作者、清华大学博士后周华告诉《中国科学报》，他们将PET升级回收为化学材料和燃料，也表明了以电化学升级回收策略清除塑料垃圾的潜力。

### 产业化仍存阻碍

相比机械回收，化学回收重要的优势之一是可以获得原始聚合物的质量、更高的塑料回收率。不过，化学回收虽然能为循环塑料经济助一臂之力，但要想展开大规模应用，每种方法都存在各自的缺陷。

将聚缩醛直接化学转化回单体，单体来源不确定就是一大问题。在王献红看来，1,3—二氧环戊烷是个特殊单体，如何实现百万吨甚至千万吨的制备依然有很大的不确定性。仍然需要研究新单体的设计，尤其是便于大规模制备的单体。

不仅如此，王献红对记者表示，从材料性能角度而言，尽管聚缩醛在力学性能上媲美聚烯烃，但其主链存在醚键（-OCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>-，-OCH<sub>2</sub>-），因此抗氧化性、耐老化性都不如聚烯烃，同时耐温性和抗蠕变性也远低于聚烯烃，大大限制了应用范围。

此外，这种单体的回收工艺也十分复杂。王献红指出，Coates课题组的研究只是展示了聚缩醛可以直接转为单体这一特征，但其回收过程需要在较高温（150℃）和有机强酸下进行，这会增加对设备的腐蚀度，提高回收成本。因此，未来仍需要研究单体回收的环保方案，如尝试在弱酸或不加酸的条件下回收。

中国塑料加工工业协会降解塑料专业委员会秘书长翁云宣向《中国科学报》分析指出，在单体回收过程中，多种聚合物甚至各种材料混合在一起，造成回收效率低的问题，这也会影响该技术的规模化应用。此外，回收再利用后如何降低成本，也需要进一步探索。

任何一项技术从诞生到实现工业化都有一条漫长的路径。周华告诉记者，通过电催化将废弃PET塑料升级再造，从实验室规模迈向工业规模的一个关键在于流动反应器的设计和优化。他们实验过程中使用的反应器优点是组装方便，且易于做催化剂活性评价，但缺点是无法用于大规模生产、造价高。

当前，段昊泓课题组正在开发的新型无膜电堆具有成本低、可规模化等优点，已经取得一些重要进展，且研究成果待发表。他们希望通过不断优化催化剂、反应器、操作条件等，最终实现废弃资源转化的工业应用。

---

## 化学回收未来可期

塑料垃圾不仅是一个全球性的污染问题，还是一种碳含量高、成本低、可在全球范围内获得的原料，循环经济也成为塑料行业未来的发展方向。在催化技术的推动下，化学回收展现出很好的经济前景。

周华表示，通过工艺整合，提高产物价值，使得塑料回收在经济上具有潜在可行性。初步估计，在商业相关电流密度下，每吨废PET向上循环的净收入约为350美元，展现了废弃PET电催化向上循环转化为二甲酸钾、精对苯二甲酸和氢气的经济潜力。

二甲酸钾具有生物活性，能抑制大肠杆菌、沙门氏菌等有害微生物的繁殖，可以促进动物生长，是一种理想的非抗生素类饲料添加剂，可替代抗生素促生长剂。周华说，随着我国采取立法手段禁止饲料添加抗生素，二甲酸钾在国内具有广阔的应用场景。

麦肯锡咨询公司在—项研究中提出，到2030年，全球塑料的回收利用率有望提高到50%。化学回收的比例可能上升到17%左右，相当于回收大约7400万吨废弃塑料。

目前，我国还有很多团队致力于研究塑料的化学回收技术，例如，中国科学院上海有机化学研究所研究员黄正团队采用铈配合物和氧化铁复合催化剂，将聚乙烯高选择性转化为液态烷烃；北京大学教授李子臣团队设计出系列苯并硫代己内酯单体，在有机碱催化下可得到力学性能优异的半结晶聚酯，该材料可直接进行本体加热（200℃）回收，单体回收率接近定量（>98%）。

王献红表示，对现有废弃塑料的化学回收是目前很受关注的研究方向，其最大的难点在于塑料制品通常是混合物，同时还有种类繁多、结构复杂的加工和改性助剂，会影响催化剂的活性和选择性。

为此，他建议首先要设计新型单体，发展新型聚合方法，综合改善聚合物的热力学性能，实现规模应用。其次要设计目标需求型可降解高分子，根据使用条件、环境的不同，设计合成相应寿命的材料。此外还要研究高度耐受性、特异选择性塑料降解催化剂，简化塑料回收过程中的分拣、洗涤等后处理工作。

王献红补充道，目前塑料回收再利用体系尚不完善，回收利用成本高昂且附加值较低，为此发展生物降解高分子材料，有助于缓解塑料回收难题。

翁云宣建议，塑料要想实现可持续发展，在源头上就要尽量使用可再生资源制造材料。周华也表示，要以代替化石资源的生物质、二氧化碳及其衍生物为原料制备塑料，新型可降解塑料是未来值得关注的研究方向。（来源：中国科学报李惠钰）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41467-021-25048-x>

版权声明：凡本网注明来源：中国科学报、科学网、科学新闻杂志的所有作品，网站转载，请在正文上方注明来源和作者，且不得对内容作实质性改动；微信公众号、头条号等新媒体平台，转载请联系授权。邮箱：shouquan@stimes.cn。

作者：段昊泓等 来源：《自然—通讯》

---

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://www.iikx.com)转发