



科学促进可持续发展 发展的塑料

第8届化学科学与社会高峰论坛 (CS3) 白皮书

英国 伦敦 2019年11月



中国化学会
北京市中关村北一街2号
www.chemsoc.org.cn

联系人：韩立冬
hanlidong@iccas.ac.cn

2019年11月

目 录

●	04	化学科学与社会高峰论坛（CS3）简介
●	05	本报告中使用的术语释义
●	06	总结和建议
●	12	第一章 塑料的影响
●	17	第二章 新型可持续塑料
●	22	第三章 塑料的回收
●	28	第四章 塑料的降解
●	33	附录
●	34	缩略语词汇表
●	34	常见聚合物的结构及其回收符号
●	35	扩展阅读
●	36	CS3 与会代表名录

化学科学与社会高峰论坛 (CS3) 简介

CS3 汇集了顶尖的研究人员，讨论化学科学如何帮助解决当今世界面临的一些最艰巨的挑战。以前的论坛已经讨论过如水资源、人类健康以及可持续发展等各种各样的主题。

本白皮书《科学促进可持续发展的塑料》总结了 2019 年 11 月 10 日至 13 日在英国伦敦举行的第 8 届 CS3 会议的演讲、讨论和成果。来自四个参与国的 30 多位科学家汇聚一堂讨论了可持续塑料的四个主要议题：塑料对环境的影响、新型可持续塑料、塑料的回收和塑料的降解。

会议的目标是评估可持续塑料的现状，确定该领域最紧迫的研究挑战，并就该领域应如何发展提出建议。CS3 是由几个主要国际化学学会合作倡议成立的。本报告经由中国化学会 (CCS)、德国化学会 (GDCh)、日本化学会 (CSJ) 和英国皇家化学会 (RSC) 的合作沟通后成文。会议得到了中国国家自然科学基金委员会 (NSFC)、德国研究基金会 (DFG)、日本科学与技术厅 (JST) 和英国工程与物理科学研究理事会 (EPSRC) 的支持。CS3 会议每两年一次，在各成员国轮流举办。



CHINESE
CHEMICAL
SOCIETY



ROYAL SOCIETY
OF CHEMISTRY



GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER



Engineering and
Physical Sciences
Research Council



Deutsche
Forschungsgemeinschaft
German Research Foundation

本报告中使用的术语释义

添加剂：大多数塑料包含各种有助于维持其长期性能的添加剂。典型的添加剂包括抗氧化剂、防静电剂、着色剂、固化剂、阻燃剂、热稳定剂、紫外线稳定剂、增塑剂和润滑剂等。

生物基或生物衍生塑料：一种由生物资源生产的聚合物，包括植物和藻类衍生的化学物质。例如，聚丙交酯可由甘蔗等植物中获取的糖来生产。

可生物降解塑料：一种能被微生物和生物分子（例如酶）加速降解，最终降解成可被天然生物代谢的小分子的塑料。可生物降解塑料应能分解为天然材料，可以返回到环境中而不会造成污染或有害影响。

生物聚合物：天然存在的聚合物，例如纤维素或淀粉。

化学回收：将聚合物降解为可用于再次生产新的聚合物和基础化学品的单体和化学原料的过程。经过化学回收后，最终制成的聚合物和基础化学品在化学结构上与起始聚合物一致。

循环经济：通过有效的材料使用、重复利用和循环利用，使资源尽可能长时间保持循环的系统。它是制造材料、使用材料、处置材料这种线性经济模式的替代选择。

闭环回收：在不影响材料质量的情况下，塑料被反复回收和再利用的循环系统。这种回收目

前已用于聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）的化学回收。

可堆肥塑料：属于可生物降解塑料中的一类，它能够在较低温度的家用堆肥系统或较高温度的工业堆肥设施中分解。

可降解聚合物或塑料：是指所含化学物质可通过回收利用或生物降解实现链分解的聚合物或塑料。

解组装：将聚合物链分解成较短的亚单元和单体，以帮助回收。可降解聚合物的链分解能在适当的时间被触发。

环境可降解塑料：可随时间推移完全分解并吸收到自然环境中而不会产生任何毒性或负面环境影响的塑料。

机械回收：一种将废塑料通过熔融和挤出重新制成新的塑料产品的回收过程。与原始塑料相比，机械回收所得材料的性能与价值通常都会降低。

开环回收（也称为级联回收）：一种将废旧材料转化为新产品和其他废料的回收过程。此过程通常与塑料的低等级应用相关。例如，聚烯烃通过开环回收生产沥青的添加剂。

升级回收：一种创造比原始产品更高质量或高价值产品的回收过程。例如，对塑料管进行化学改性以提高其耐热性或赋予其抗菌性能。

总结与建议

塑料帮助建立了现代世界：它使我们的食物新鲜安全；它被用来建造我们的城市、房屋，甚至用于制作我们睡觉用的床垫；它为绿色革命提供动力，可用于生产轻型电动汽车和太阳能电池；它是手机和计算机的基本组成部分；它可以推动医学的发展，从口罩、隐形眼镜、心脏隔膜泵到人造组织都有其身影（见“什么是塑料？”）。

塑料对于建立一个更具可持续发展的社会，确保未来的技术快速发展并具有成本效益至关重要。塑料包装通过延长食品的保质期来减少食品浪费，并且在检测食品质量方面起着重要作用。塑料复合材料方面的最新进展，使得飞机主要结构的 50% 可由塑料构成，从而大大降低了温室气体的排放。

减少我们对化石燃料依赖的关键未来技术也将需要塑料。例如，相比于汽油车，电动汽车可以使用更多的轻质塑料来替代金属部件，如能量回收装置、冷却管、泵、风扇、外壳等等。电动汽车中使用的塑料已经迅速增长。风力涡轮机叶片需要塑料复合材料和粘合剂。塑料可用作电池的外壳，甚至可用作电解质和其他电池组分。塑料还广泛用于家庭隔热，减少了能源消耗。它们在建筑领域中起着至关重要的作用，用作管道和导管、外覆面、密封件、粘合剂和垫圈。将来，塑料复合材料可以代替承重结构中的金属，并且可能在智能建筑中作为检测和监视系统的重要组成部分。在水净化系统中，塑料是必不可少的活性层。它还可提高农业效率，例如减少用水量和提高产量。机器人、无人机、电子、个性化医疗和诊断等未来技术领域都依赖于性能更好的塑料材料的开发。

尽管有上述这些好处，塑料的使用也造成了重大的环境挑战。塑料的制造要消耗大量的石油资源：例如，根据欧洲塑料工业协会的数据，在欧洲，塑料生产的原油消耗量约占所有石油和天然气使用量的 4~6%。由于塑料与石化行业紧密相关，因此它们会受到油价波动、地缘政治以及二氧化碳减排政策的影响。

被丢弃的塑料污染了自然界，在许多生态系统中都检测到了微塑料和纳米塑料（见“塑料污染物的大小分类”）。大部分塑料废物是在陆地上产生和排放的，但是对塑料污染的研究最初主要集中在海洋环境。据报道，塑料颗粒从热带到原始的极地

什么是塑料？

塑料主要由聚合物以及影响材料物理特性的各种添加剂（例如稳定剂、阻燃剂和增塑剂）组成。聚合物是由被称为单体的较小重复单元构成的长链分子。一些聚合物仅包含一种类型的结构单元；其他的称为共聚物的聚合物可能包含两种或更多种不同类型的单体。聚合物链的组装可以跨越多个长度尺度（参见图 4.2：不同尺度下塑料的结构）；深入理解塑料特性（包括其分解）与其不同层次结构之间的关系也是聚合物科学的一个关键问题。

塑料污染物的大小分类：

塑料的大小是确定其环境影响的重要因素，通用尺寸范围是：

大塑料：大于 2.5 厘米	中塑料：5 毫米至 2.5 厘米
微塑料：1 微米至 5 毫米	纳米塑料：小于 1 微米

地区，从海滩到深海沉积物都有其身影。后来，人们检测了河流和湖泊系统，发现即使在偏远的高山湖泊中也有了塑料颗粒。最近，在大气和陆地生态系统中，特别是在城市和农田土壤中也发现了塑料颗粒。科学家目前已经对来自水生和陆地环境的各种生物体经食物摄入的塑料颗粒情况进行了研究，其对生物体和人类健康产生的影响仍在讨论中。

与塑料颗粒有关的可能风险无法一概而论，因为微塑料和纳米塑料囊括了性质迥异的各种颗粒，这些颗粒的聚合物组成、添加剂含量、尺寸、形状、老化状态不同，因此其物理化学性质亦各不相同。但是，近年来普遍存在的由微塑料和纳米塑料引起的环境污染及其对生态系统和最终对人类健康的潜在风险，已经引起了公众和科学界的广泛关注。

对公众而言，塑料是一种用后即丢的生活方式的典型代表，经常与廉价、低质量和低价值的产品联系在一起。随处可见的塑料污染证据以及这些材料的未知影响正在促使人们重新考量其生命周期、设计和用途。我们将需要技术解决方案来确保将来的塑料在具有实用性能的同时有更好的后处理方案，而化学将发挥核心作用。

化学的发展对于理解和减轻塑料对环境的影响至关重要。化学可以帮助开发有效的方法来回收我们今天使用的塑料。从长远来看，化学可以创造由可持续原材料制成的替代品，它们更适合在使用寿命终结时回收，其环境持久性或环境影响也更低。

可持续性贯穿塑料的全生命周期将成为未来聚合物设计的核心特征。正如现在不同的塑料用于不同的用途一样，将来需要使用一组材料来满足多种应用需求。我们

建议对多种不同的技术和方案进行支持和投资。还必须强调的是，没有一种解决方案适用于所有情况、所有地区或产品。不同国家已经采用了各种各样的废物管理办法，其对环境的影响程度也各不相同。因此，针对特定地区的最可持续的解决方案不一定全球通用。

在某些情况下，完全由可再生的、生物来源的化学原料或由二氧化碳等废物（这些用以生产聚合物的原料是碳中性的）制成聚合物，将使整个过程更具可持续性。对于某些应用场景来说，经久耐用的聚合物是最佳选择，其可以在有效的闭环回收之前多次重复使用。而在其他情况下，很重要的一点是设计聚合物时应使其具有特殊的化学和物理特性，能够“按需降解”，这将减少能源消耗并提高闭环回收的选择性。根本上，需要设计能高效分解的聚合物，使其能在多个循环中实现闭环回收，即便它脱离废物回收系统时也能降低甚至完全消除对环境的影响。

我们认识到，要为塑料确立新的未来，就必须在科学、工程、技术、材料设计、人文、人类行为、政策、法规、经济和商业之间进行深度合作。本报告仅侧重于在技术上可行的贡献和解决方案，以及化学和相关科学特有的研究挑战。我们尽量避免就有关回收利用、废物管理系统、财政和税收激励等方面的政策或法规提出建议。（扩展阅读材料包括有关近期政策简报、专家工作组针对这些重要并行问题的报告等参考文献）。

在提出建议时，我们强调仅靠技术不能提供所有解决方案，需要废物管理、法规、经济和人们行为等方面的共同进步才能为塑料的可持续未来提供基础设施和生态系统。我们的提示是，化学方面的专家将为有关塑料的政策制定和标准化以及环境监测和检测提供不偏不倚的证据。

我们提出了四个主要的研究挑战及其基础研究重点。这些研究挑战是相互联系和共生的，因此，我们建议不要倾向性地选择支持某一特定研究方向。我们的理念是，塑料不应被故意释放或倾倒入环境中，高效的闭环废物管理系统对于实施这些技术进步和解决方案至关重要。要解决这些技术挑战，需要我们与一系列其他技术学科通力合作，并将上述挑战同时纳入考虑。

为了确保未来的研究人员能够在这一领域进行有效地创新，对化学工作者进行高分子科学、材料工程、工艺设计、生态毒理学、分子生物学、环境科学、生命周期评估和数据分析等方面的多学科培训与教育至关重要。我们科学界已经认识到，外联、宣传和公众参与程度对推动有关未来塑料影响和解决方案的公众对话大有裨益，而且这也是一个迫切需求；并且，通过使用全生命周期方法来考察可选材料，使其符合可持续发展的目标，将助益良多。

研究挑战 1：理解塑料在整个生命周期中的影响

（1）开发新的分析方法，以研究不同类型和形状以及不同大小和时间周期下的

微塑料和纳米塑料。这应包括高通量光谱学和显微技术，这些技术可以快速生成有关环境中微塑料的尺寸分布、结构和性质的可再现数据。

(2) 这些数据应被用于预测模型，用于模拟微塑料在环境中的迁移和分布，这将有助于理解塑料废物的位置、归宿与持久性。将来，这些模型还可能有助于在新塑料投放市场之前用于预测其对环境的影响。

(3) 需要进行研究以正确理解包括土壤、淡水和海洋在内的各种环境中影响微塑料和纳米塑料形成的因素。

(4) 在所有废物碎片尺度下，我们都必须了解塑料及其降解产物是否具有毒性。这将需要对与微塑料化学和颗粒毒性有关的生物学途径有详细认识。还应考虑直接和间接的生态影响，例如它可能会减少其他物种的食物供应，运输污染物以及形成生物膜。

(5) 塑料对环境的影响不局限于使用寿命终止后的降解。在它们的整个生命周期中都会产生影响。我们需要详细的生命周期和可持续性评估，以在其使用功效与环境影响之间做出权衡取舍，并确定专注于减少其影响的重点研究方向。

研究挑战 2：开发可持续的新型塑料

(1) 必须设计适应于循环经济并便于回收的新型塑料。研究人员应开发能提高闭环回收效率的聚合物。这样可以生产出具有卓越性能且能够“按需降解”的材料，且其降解产物可通过化学方法回收，以再次生产聚合物或转化为其他高价值产品。这一理念的核心是，设计可分解并能可控分解为较小的可回收再利用亚单元（低聚物和小分子）的聚合物结构。在机械回收后能够保持理想材料性能的新型塑料也是一个目标，例如通过扩链或自修复工艺保证其再利用时的性能。

(2) 需要进行研究以便能从非原始的石化和生物基原料生产新的聚合物。替代原料应包括回收的化学品，例如来自塑料回收的化学品、（可持续的）生物质、工业废物（如 CO₂）和改性的生物聚合物（如纤维素或淀粉）等。这些用于制造聚合物的单体必须是大量的、来源丰富和真正可持续的。从长远来看，塑料的生产要与原始化石燃料的使用以及燃料行业脱钩。

(3) 需要遵循严格的可持续性指标的新工艺来制造、加工和回收塑料。而实现这些有效工艺的核心是发展催化体系和催化反应。即使仍处于实验室开发早期阶段，新工艺也应在高效制备和工艺放大方面具有足够的潜力。

(4) 在某些领域，提高塑料的可持续性将需要生产更持久耐用的聚合物。这些塑料需要在适当的使用时间范围内保持其基本属性与性能，但必须从一开始就按照可管理的报废方案进行设计。研究增强相互作用的替代方法，尤其是开发热固性树脂和交联网络的替代方法成为当务之急。建议尝试使用非共价或平衡相互作用的方法，确保材料在保有本身特性的同时便于回收和 / 或后处理。研究还应集中于如何控制材料

的结晶和降低结晶度，因为结晶赋予了材料有用的性能，但也使材料使用后的链分解速度变慢。

(5) 设计新塑料时必须考虑其在多重尺度范围内的性能，包括单体序列、聚合物链相互作用以及微纳结构。开发新的实验方法和理论对理解聚合物结构与性能之间的关系至关重要。将来，使用单一塑料构成复合材料将成为可能，即通过对不同长度尺度下聚合物的结构进行调控实现单一化学结构的聚合物发挥多种功能。例如，确保在包装商品时仅将单一类型的材料用于外包装、粘合剂和阻隔层，这将可以简化回收过程。

(6) 应开发设计数据、分析表征方法和模型以阐明聚合和解聚过程。需要新的理论和方法，来准确地预测在多种长度和时间尺度内聚合物的性能和分解过程。

研究挑战 3：闭环塑料回收

(1) 需要化学技术来改进将废塑料和复合材料进行标记、鉴定和分离为单组分、纯聚合物的能力。这些聚合物应重新加工成新产品和 / 或通过化学处理完全回收为纯聚合物。

(2) 需要更有效的化学回收工艺从废物中回收有价值的低聚物、单体和 / 或小分子。应开发能有效用于聚合物复合材料和混合塑料的化学回收技术。这些技术包括新的催化剂、工艺和反应，可对当前大规模使用的聚合物进行化学回收（例如聚烯烃，目前尚无法实现以足够的效率或化学选择性将其回收为单体）。

(3) 为了赋予塑料更好的可回收性，应研究更接近平衡的聚合和解聚反应。这种方法可能带来额外的性能优势，例如生产具有更长使用寿命且可以降低回收能耗的自修复塑料。

(4) 在某些情况下，通过处理废塑料来回收其所蕴含的能量可能也是合适的，例如，通过焚烧它们来发电。在这种情况下，应以可持续的方式捕获和存储任何产生的二氧化碳或其他温室气体；亦有可能将废弃的二氧化碳再循环为新的塑料，以实现“碳循环”。

研究挑战 4：理解并控制塑料降解

(1) 必须研究如何降低塑料的短期和长期环境影响。对于某些应用，这涉及开发可环境降解的聚合物。这在诸如一次性医疗产品、个人护理用品以及某些包装和农用塑料等应用领域尤为重要。此类可环境降解聚合物应成为防止废塑料泄漏到环境中的一道防护网，但不应将它们视为进行塑料回收的一种替代或向环境中丢弃塑料的借口。我们建议仔细检查聚合物的标准和标签，以确保正确理解诸如可堆肥、可生物降解和可环境降解聚合物等术语。必须进行研究以确定聚合物降解反应发生的原因、程度和时间周期，并了解降解产物对自然环境的影响。

(2) 需要进行研究以了解在发现其存在的广泛环境中聚合物是如何降解的。这应该包括聚合物和塑料结构是怎样受到湿度、pH、温度、光照、生物和酶的影响, 以及这些影响因素之间的相互作用。建议进行相关研究, 以便获得有关聚合物的化学组成、形态和结晶度如何影响其在一些实际环境中降解行为的更全面的数据。还必须充分考虑降解产物以及这些塑料中包含的任何添加剂的环境归宿与影响。

(3) 需要研究开发可回收利用和环境可降解的材料, 这样的材料可以通过聚合-解聚的循环多次回收利用而性能不会降低。但在有效回收利用结束时, 它们能够降解为无毒产品, 并可以被环境中的生物代谢。同时很重要的是, 针对当今使用的某些不可降解聚合物, 应制定策略以了解并改善其环境可降解性。

(4) 可环境降解聚合物将需要在性能和成本方面具有竞争力, 因此, 用于制备这些聚合物的单体和聚合方法必须是可规模化的、高效、经济和可持续的。不可能有单种材料就能够为所有应用提供所有性能, 因此需要一系列的新型可环境降解聚合物, 每种都针对特定的应用量身定制, 并且可以在不同的时间周期内降解。

第一章 塑料的影响

塑料是现代生活的重要组成部分，也是可持续发展必不可少的工具。如今，从原料的提取生产引起的温室气体排放到塑料废弃造成的环境污染，一些石化基塑料已对环境产生了不可忽略的影响。化学可以通过开发可持续手段和适宜的循环经济模式来帮助了解和减轻塑料产生的影响。

引言

在过去的几十年中，塑料产量大幅增长，几乎没有放缓的迹象。目前，塑料的年产量将近 3.6 亿吨，超过了大多数其他人造材料（见图 1.1：常见的塑料）。截止到 2015 年，人类累计生产了约 83 亿吨塑料，其中约 63 亿吨已经成为废弃物，而只有 9% 被回收利用（Sci. Adv., 2017, DOI: 10.1126 / sciadv.1700782）。

全世界每分钟售出一百万个塑料瓶，挥霍的消费方式显然是其原因之一。对废旧塑料的管理不善也常常导致废塑料泄漏到环境中。据研究人员估计，每年有 3190 万吨塑料废物因管理不善而进入环境，其中的 480~1270 万吨进入海洋（Science, 2018, DOI: 10.1126 / science.aar7734）。并且，巨量的塑料废物也污染着陆地生态系统（Environ. Sci. Technol., 2019, DOI: 10.1021 / acs.est.9b02900）。这种污染会对野生动植物、我们的生存环境及自身健康构成威胁。

塑料制造不仅需要石化原料，还需要能源。因此，它们的制造加剧了整体工业 CO₂ 排放（见图 1.2：塑料的碳足迹）。使用非化石能源或低能消耗的制造方式可以带来巨大的好处。如今，用于制造最常见的塑料的单体原料是石化燃料行业的副产品，但从长远来看，我们将需要减少对石化燃料的依赖，并开发不以原始石化原料为基础的塑料制造技术（请参阅第 2 章：可持续的新型塑料）。需要强调的是，与许多替代材料（例如玻璃或钢）相比，生产塑料的能耗更低。如果开发出有效的废物管理手段，在许多情形下，特别是在二氧化碳减排方面，使用塑料是一种比其他替代材料更可持续的选择。选择用于特定用途的材料（例如包装）时，应对其生命周期及可持续性进行均衡的、有据可循的评估。我们强烈建议不要在未经这种分析的情况下用“替代品”取代塑料。

有许多替代石化基聚合物的策略可以改善塑料的可持续性。一种方法是用生物基产物替代现有的石化基塑料。生物衍生塑料中的聚合物分子结构与石化基塑料相同，但其单体来源不同。另一种截然不同的策略是用全新的材料代替现有的聚合物。当新型聚合物被设计得便于回收或环境降解时，其可能颇受欢迎，但它也可能导致不太理想的后果，例如与当前的加工或共混技术不兼容，或生产出的材料物理和化学性能不佳。

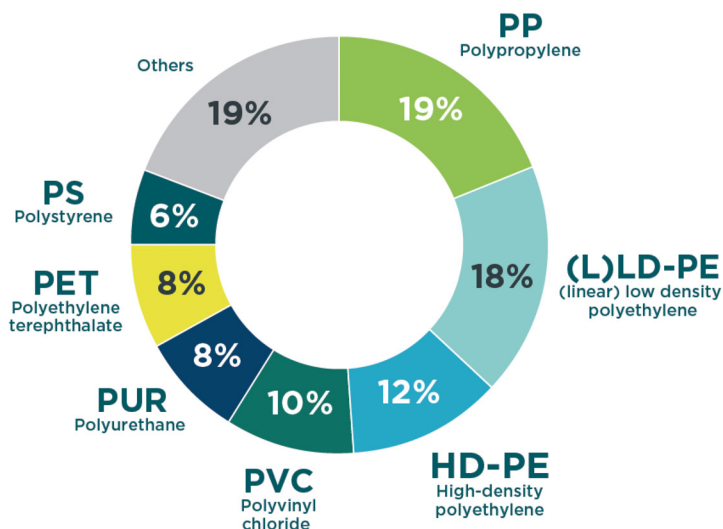


图 1.1 常见的塑料

2018 年，全球塑料产量达到 3.59 亿吨。这些塑料中约有一半是由不同形式的聚乙烯 (PE) 或聚丙烯 (PP) 制成的。（百分比显示出欧洲的相对需求量；常见聚合物的结构见附录）。摘自 Plastics — the Facts 2019, PlasticsEurope (2019)。



图 1.2 塑料的碳足迹

2019 年全球 CO₂ 排放量超过 360 亿吨，因塑料的生产、处理和焚烧而向大气中排放了 8.6 亿吨 CO₂（或等效的温室气体），相当于近 200 个典型燃煤电站的排放量。到 2050 年，塑料的碳足迹预计将增加三倍。数据来源：Plastic & Climate: The Hidden Costs of a Plastic Planet, Center for International Environmental Law (2019)

到处都是微塑料

塑料污染的影响部分取决于塑料废物的尺寸（请参见“塑料污染物的大小分类”）。在鲸鱼的胃中发现了诸如聚乙烯塑料袋这样的大型塑料制品。人们发现海鸟会吞食较小的塑料块，而废弃的渔网则经常会缠住海狮等哺乳动物。2012 年，联合国估计塑料废弃物每年造成大约 100 万海鸟和超过 10 万海洋哺乳动物死亡。

直径小于 5 毫米的废塑料碎片或纤维被称为微塑料，它们可能是以该尺寸生产的，也可能是环境中较大的塑料物品分解所形成的。自从首次大规模生产塑料以来，微塑料就可能已经存在于环境中，但是在海洋中检测到它们的第一份报告只能追溯到 1972 年（Science, 1972, DOI: 10.1126 / science.175.4027.1240）。过去 15 年的研究表明这些微塑料在环境中无处不在。

对于浮游生物、贝类、其他滤食动物以及在食物链底端的土壤生物而言，微塑料的尺寸恰好适合它们摄入。以这些生物为食的大型动物随后会在自己体内富集微塑料。例如，最近对 102 只海龟的调查发现，每只海龟肠道内都有微塑料（Global Change Biology, 2018, DOI : 10.1111 / gcb.14519）。

尚不清楚这些细小的碎片是否会危害摄入它们的动物，但是，微塑料已被证实可以减缓水生蠕虫的消化系统，从而使它们在生长时体重减轻。塑料的添加剂（例如邻苯二甲酸酯增塑剂）也会在蠕虫体内富集，从而可能阻碍其繁殖。与此同时，人类在食用海鲜时也会接触到微塑料，但目前尚不清楚后果。肠道微生物群落对于吸收营养至关重要，并且在免疫系统中起着重要作用，口服摄入微塑料可能会对肠道微生物群落产生负面影响。人们已经对微塑料通过消化道迁移进入细胞和组织的潜在风险开展了大量讨论（这可能导致炎症），但尚未有充分研究和深入的了解。另一个未证实的风险是通过呼吸空气吸入塑料微粒。当微塑料分解成小于一微米的碎片时，它们会形成纳米塑料。由于其较小的尺寸，它们更有可能被生物吸收。迄今为止，我们对纳米塑料的生物影响知之甚少。

微塑料甚至可能妨碍自然界抵抗气候变化的能力。浮游植物可以利用光合作用每天从大气中捕获数百万吨的碳，并且某些类型的浮游植物可以通过粪便颗粒将这些碳排泄到大洋底部，这是长期的碳储存机制。但是当浮游植物摄入微塑料时，会使粪便颗粒的组成发生改变，使它们变得更容易漂浮，并将捕获的碳又释放回大气中。

追踪微塑料

为了更多地了解微塑料的来源和行为，研究团队从水、沉积物、土壤、空气、植物和动物中收集了微塑料样品，使用包括光学和电子显微镜、X 射线分析以及拉曼和红外光谱等一系列技术来研究这些样品。这类分析可以揭示微塑料的组成、物理形态以及产生方式。塑料可以通过一系列不同的化学和物理机制分解为微塑料，包括暴露于紫外线、氧化、热分解或仅仅是在海浪中翻滚（请参阅第 4 章：塑料的降解）。

这些数据可用于大规模模拟塑料废物在环境中的分布和行为。例如，太平洋地区的塑料污染的初步模型已用于预测塑料废物如何迁移（*Nat. Commun.*, 2019, DOI: 10.1038/s41467-019-08316-9）。淡水和陆地系统中的相应研究也应同步跟上。

为了获取更多这方面数据，研究人员需要能够更快速地进行分析，例如可以在河流系统、污水处理厂或海洋调查船上使用高通量方法。预测模型还取决于了解某些塑料在环境中可能存在多长时间以及它们降解的速度，这与其化学和材料特性有着内在的联系。微塑料还会渗出添加剂，并可能在环境中吸收持久性有机污染物或有毒金属，这两种污染物都会对环境造成额外影响。原则上，这些因素也应纳入微塑性分析模型中。

海洋环境中的微量塑料样品不仅应从海面收集，而且还应从一系列深度的水体和海底沉积物中收集。这样可以帮助揭示各种密度的微塑料的归宿，也可以增进我们对几十年前进入海洋的微塑料历史演变的了解（*Sci. Adv.*, 2019, DOI: 10.1126 / sciadv.aax0587）。一些研究人员已经研究了国际环境标本库中保存的死亡动物样本中的塑料，该标本库存有包括鱼和海鸟在内的成千上万个标本。研究人员正加紧研究，以寻找微塑料污染的历史证据。

从多种来源获取数据并将它们组合成有用的模型将需要多学科的研究工作，包括许多不同领域如高分子化学、分析化学、生物化学、环境化学、物理海洋学和信息学之间的更多合作。

塑料地膜

塑料污染不仅限于海洋和淡水。在某些国家 / 地区，农户正面临着日益严重的来自土壤中塑料污染的威胁，部分原因是覆膜农业栽培模式。播种后不久，将聚乙烯薄片组成的塑料覆盖膜用于覆盖农田，它们可以帮助提高土壤温度、限制杂草生长以及防止水分流失，从而减少用水、提早收获和提高作物产量。随着世界人口的增长和食品需求的增加，塑料地膜在农业中发挥了关键作用。例如，2018 年中国使用了 140 万吨塑料地膜，覆盖了大约 2000 万公顷的农作物土地。

但是，当农民除去薄膜时，通常会留下一些塑料残渣。由于聚乙烯不可降解，这些塑料残渣会积聚在土壤中，使土壤结构变差，妨碍植物生长并可能缠绕农用机械。覆膜对于高效农业很重要，尽管存在一些问题，农民还是不愿放弃覆膜带来的好处。替代型塑料可以减少这些环境影响，一种策略是开发可环境降解的塑料薄膜，这样将无需再收集废塑料，同时确保任何残留物都能分解成土壤中的良性化合物。在单个塑料中实现这些特性并非易事，但是化学科学足以应对这一挑战（请参阅第 4 章：塑料的降解）。

结 论

塑料污染严重影响着我们的自然环境。微塑料和纳米塑料尤其应受到关注，我们需要进行系



塑料覆盖膜用于提高农作物的生长效率

统的研究，以正确理解影响其在包括土壤、淡水和海洋在内的各种环境中形成的因素。研究人员需要借助新的分析方法来研究不同尺度下的微塑料和纳米塑料。

模拟环境中微塑料分布的预测模型也将有助于了解塑料废弃物的环境演变和持久性。这些模型可以跟踪微塑料的确切位置、环境中塑料碎片的存量以及它们之间的交互变化。

研究人员需要了解各种尺度的塑料及其降解产物的环境毒性，以及与微塑料和纳米塑料化学和颗粒毒性有关的生物学途径。研究还应考虑直接和间接的生态影响，例如减少其他物种的食物供应、污染物的迁移以及生物膜的形成。这些潜在的影响不仅可能由石化基塑料引起，如果生物基塑料在环境中破碎成小颗粒，也可能带来这些影响。

塑料对环境的影响不仅限于使用寿命终止后的降解。由于塑料在制造和应用过程中要使用能源和其他资源，也会产生环境影响。我们需要详细的生命周期及可持续性评估，以在其功能与环境影响之间做出合理取舍，并确保研究重点专注于减少塑料的危害。

总体而言，很明显，对塑料废物采取“一切照旧”的方法是不可持续的，而且当前和未来的许多行业都需要在塑料领域进行创新，以提供更可持续的产品。化学，在确保我们以更可持续方式继续受益于塑料的便利方面，起着至关重要的作用。

改变可持续性的核心，是将我们目前的“线性塑料经济”转变为“循环经济”。线性经济涉及产品的生产、使用和处置；与之截然不同，循环经济力求将这些过程变成一个循环，以便在可再生能源驱动的过程中多次重复使用或回收废弃产品。转向循环经济可能会大大减少我们对资源的使用，并有助于实现 2016 年《巴黎气候变化协定》中设定的目标。这种转变对于确保我们实现联合国可持续发展目标也至关重要。

开发更好的回收废塑料的方法也很重要。为此，化学家可以开发新技术来将废塑料分解为低聚物和小分子，这些低聚物和小分子可以再次用于制造塑料和其他高价值产品。同时，使用可再生原材料和高能效的制造工艺可以帮助减少塑料对气候的影响（请参阅第 2 章：可持续的新型塑料）。几乎在塑料生命周期的每个阶段，要实现塑料循环经济所需的技术都将依赖于化学。

第二章 可持续的新型塑料

为了开发可持续塑料，研究人员正在研发不仅在使用寿命期间具有出色性能并且可提供废弃后管理选项的聚合物。生命周期评估方法应成为提高聚合物生产效率、降低能耗的举措的基础和前提。在某些情况下，使用废塑料、生物基材料甚至 CO₂ 作为原料来制造新型塑料将能有所帮助。理想情况下，可再生原料作为“替代品”应该适应现有化学工艺。

引言

当今市场上的绝大多数塑料都是由来自石油和天然气的石化产品制成的。若继续使用这些原材料将需要降低相关工艺过程的能耗和碳排放，因此需要在改良制造和加工工艺方面加强研究。长远看来，世界可能会发生产业变革，将从主要基于化石燃料的生产系统，转变为使用可再生能源，以可回收化学品或可再生资源为原料的生产系统。化学还可以帮助开发途径，通过回收利用废 CO₂ 作为共聚单体嵌入聚合物主链来制备塑料。

最常见的石化基聚合物，例如聚乙烯和聚丙烯，需要经过很多年才能在环境中分解。原因是这些聚合物的分子是碳链，通常没有作为化学或生物降解的明显的“断裂点”的化学基团，此外这样的碳链通常还是疏水的。这些碳链还可以组装形成结晶区域，赋予材料优异的热和机械性能，使其极为耐用，但使用后不易降解（请参阅第 4 章：塑料的降解）。

目前科学家仅设计了少数几种在环境中易于降解的聚合物，例如聚己二酸 / 对苯二甲酸丁二酯（PBAT）。PBAT 与低密度聚乙烯（LDPE）具有相似的性能，可作为包装材料使用，并且可以用水完全降解，是一种可堆肥材料。目前几乎没有为了简化回收利用而专门设计的商品化聚合物。塑料需要进行回收设计，而相应的化学解聚领域则需要基础研究、理论指导和不断探索。一种选择是充分利用生物来源的单体（其往往比烃类含有更多的氧原子），并利用这些含氧的化学基团提供降解时的“断裂点”。另一种选择是利用链之间的非永久性相互作用来生产可以分解的聚合物，或可以以较低能耗破坏的微晶。

设计新塑料对于包装和建筑等行业至关重要，在许多其他行业，包括电子、交通、家具、休闲和农业，也都需要特种塑料（见图 2.1：塑料的用途）。这些领域可能会加快推进可持续的新型塑料，并帮助新材料在市场上站稳脚跟。

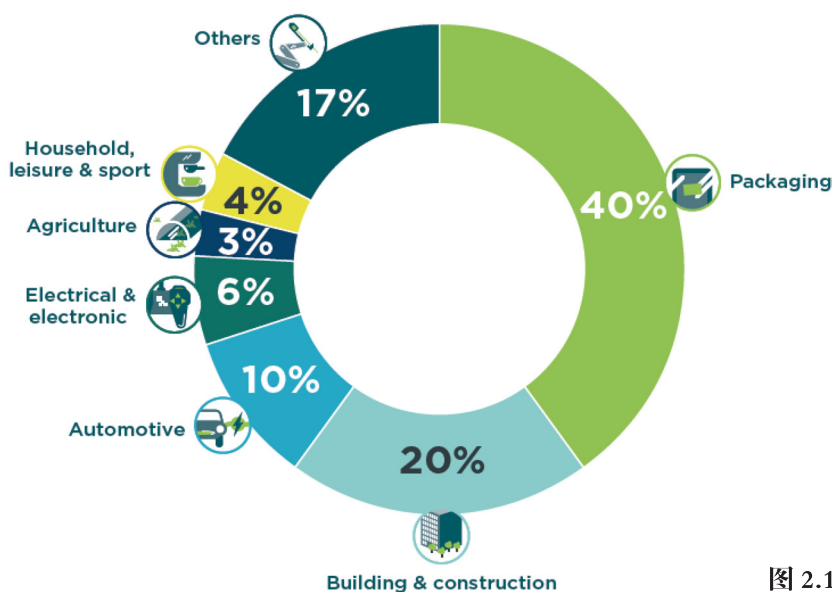


图 2.1 塑料的用途

来自可再生资源的聚合物

目前，生物基聚合物在塑料市场中只占很小的比例。聚乳酸（PLA，也称为聚丙交酯）是使用最广泛的生物基合成聚合物之一，可用于制造诸如一次性餐具和塑料杯之类的产品。得益于聚合物链中的脂肪族酯键，PLA 可以通过工业堆肥过程完全分解（见图 2.2：可持续循环）。生命周期评估表明，与传统的石化塑料（如聚乙烯和聚丙烯）相比，PLA 的总 CO₂ 排放量更低（J. Polym. Environ., 2019, DOI: 10.1007 / s10924-019-01525-9）。

PLA 通常是通过丙交酯的开环聚合反应制得的，丙交酯是一种由乳酸制成的环状二酯，而乳酸可使用从农作物（例如甘蔗）中提取的植物性糖源来发酵生产。而为了使乳酸生产更具可持续性，正在开发的新生产工艺将使用包括食品和农业废物在内的废弃木质纤维素为原料。其他内酯和环状单体可以通过聚合来制备 PLA 或其他脂肪族聚酯的类似物，这些方法可以在一定程度上实现对聚合物的化学、物理、热和机械性能的控制（Chem. Rev., 2018, DOI: 10.1021 / acs.chemrev.7b00329）。

其他生物基聚合物可以使用诸如萜烯的单体来生产，例如，从松树油中得到的松油精（Polym. Chem., 2014, DOI: 10.1039 / C3PY01320K; Angew. Chem. Int. Ed., 2016, DOI: 10.1002 / anie (201509379)）、源自废柑橘类果皮的柠檬烯氧化物和琥珀酸酐（Angew. Chem. Int. Ed., 2018, DOI: 10.1002 / anie.201801400）。



图 2.2 可持续的循环



可回收塑料示例：由回收材料制成的塑料尺

研究人员已经开发出了用于这些（共）聚合反应的高活性和选择性催化剂，但是还需要进一步的改进，将其转化为可持续的工业过程，从而生产出具有更理想特性（例如更高的机械强度和更好的阻隔性能）的塑料。

要注意的是，仅仅做到利用可再生资源生产单体并不能保证可持续性的提高。例如，可以利用葡萄糖制备乙二醇共聚单体来生产生物基聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET），但这会造成富营养化和酸化等影响。PET 的另一种共聚单体，对苯二甲酸，目前尚不能由可再生资源进行经济化生产。

衍生自糖的替代性芳香族单体有望用于生产与 PET 具有相似性能的完全生物基聚合物，但单体和聚合物的生产仍面临挑战。更好的催化剂和生产工艺可能会对此有所帮助，例如通过使用高压 CO₂ 和新型催化剂来降低聚合温度和能耗。

必须强调的是，聚合物的材料性能对其应用起决定性作用。例如，PLA 的热和机械性能决定了其可能的应用领域及不适用的工作场景。

使用废物分子

更好地重复利用来自工业、农业或其他化学过程的废物分子，对于减少与塑料相关的碳排放至关重要。并且，CO₂ 也可以与共聚单体一起用作塑料的基础材料，从许多方面来讲，它都是理想的原料——其价格便宜、资源丰富，并且是许多工业过程中产生的废物。

例如，可以通过使环氧化物与 CO₂ 反应来生产聚碳酸酯。目前这种工艺正在用于商业化生产，并且其生命周期评估也已量化确认，整体温室气体排放量有所减少 (Green Chem., 2014, DOI: 10.1039 / c4gc00513a)。CO₂ 共聚工艺在很大程度上取决于催化剂，最近的研究表明使用混合金属催化剂 (例如镁和锌) 有望提高催化性能 (Chem. Sci., 2019, DOI: 10.1039 / C9SC00385A)。随着化学家对这些金属如何相互作用的了解更加深入，将有助于开发更好的催化剂，从而使该工艺更加高效，降低制造成本并促进这些塑料的更广泛应用。

通过在乙烯的聚合过程中添加一氧化碳，从而在聚乙烯链中引入羰基。这些羰基可以充当非常方便的“断裂点”，因此，在环境中的这类聚合物分子，可以在几个月内通过酶或光的化学反应降解。这种材料已经在某些塑料包装中使用，但是它需要在极高的压力下进行相关的聚合反应，从而提高了制造成本并使该过程非常耗能。因此，化学家正致力于开发可以在更温和条件下制备此类聚合物的催化剂和方法，从而为这类可降解塑料提供更便捷的生产途径 (Macromolecules, 2014, DOI: 10.1021 / ma5012733; Polym. Chem., 2014, DOI: 10.1039 / c3py01637d)。

从长远来看，化学在开发全新的、颠覆性的塑料制备技术方面发挥着关键作用，可能用基于其他元素的新材料替代某些碳基单体。例如，硫是石化工业中的大规模废物，因此寻找将其再循环为聚合物的方法将会大有帮助。聚硫酯将硫引入聚合物结构作为方便的断裂点，未来的回收过程就能以此为切入点来展开。

天然聚合物 (例如纤维素、甲壳质和淀粉) 可以用作可再生和环境可降解的资源，既可以制造单体，也可以单独用作材料。纤维素是天然植物纤维的主要成分，也是世界上最丰富的天然聚合物。它已经被用于制造包括纤维素薄膜、纺织品和包装在内的一系列产品。

但是，加工纤维素也颇具挑战性。纤维素分子通过氢键网络交织在一起，这意味着纤维素不会熔化并且不易溶于普通溶剂。化学家正在开发一系列使纤维素加工更容易的策略，例如，通过利用离子液体溶解便宜的低级纤维素原料 (例如玉米壳或麦秸)。这可以降低纤维素加工的成本或减少操作步骤 (ACS Sustain. Chem. Eng., 2017, DOI: 10.1021 / accsuschemeng.7b00488)。寻找新的方法来微调纤维素衍生物的物理性质可能有助于开拓低成本包装等方面的应用或避免添加剂 (如增塑剂) 的使用。

大量研究工作致力于将木质纤维素废料有效转化为可用于塑料生产的单体。这些研究工作得益于多相催化、工程、生物加工和合成生物学方面的专业知识。通过生产聚合物复合材料还可以来生产聚合物 - 天然纤维复合材料，并可以改善纸张等天然材料的性能。



纤维素基塑料薄膜卷

结 论

将来应使用各种回收和再利用的化学原料来制造聚合物。这些原材料可以并且应该包括现有塑料的化学回收产品。因为聚合物是大规模生产的，所以决定采用哪种单体在很大程度上取决于原料的可获得性和价格。技术经济性和可持续性评估应在适当阶段纳入工艺转型的评估，并确保基础研究具有针对性。

用于制造和加工聚合物的基础设施花费了巨大的资本投入，短期内不应放弃。因此，开发可以使用相同基础设施的大体量塑料（如聚乙烯和聚丙烯）的可持续替代品将是研究的重点。

在设计聚合物时，对整个材料生命周期进行可持续性评估非常重要。例如，应对未来材料进行精心设计，使其毒性和环境影响降至最低。随着化学家们开发出将可再生分子和回收废物转化为聚合物的新方法，设计聚合物使其能够最终分解为对环境无害的生物化学品和产品就显得尤为重要。而且，任何新型塑料都将需要更容易回收，而且回收方式的耗能更低。需要进一步研究以增强对聚合物结构和微结构如何影响其物理性质、再利用和解聚化学的理解。

第三章 塑料的回收

从线性经济到循环经济的过渡期间，我们产生的废塑料必须被更多地回收利用。通过开发更有效的方法来回收我们目前使用的塑料，以及在将来开发可以更高效地被回收的新型塑料，化学家们能够帮助实现这一目标。要更加注重化学回收技术，将废弃的聚合物再生为高价值化学品，并再次用于聚合物制造过程或其他过程。

引言

现今使用的许多塑料已经可以通过某种方式进行回收。但是，出于技术、经济和物流方面的原因，实际上很少有塑料废品进入回收程序。根据艾伦·麦克阿瑟基金会（Ellen MacArthur Foundation）领导的一项分析，全世界约有三分之一的塑料包装废弃物泄漏到环境中，相比之下，大约有 14% 被回收再利用，40% 被填埋处理，剩余的 14% 被收集用于焚烧发电（见图 3.1：废弃塑料包装的命运）。这些百分比数值代表着全球平均水平，各国之间存在差异。

一些废塑料被随意丢弃而污染了环境，但是，废塑料在收集之后如何处理也存在问题。这些废弃物通常混合着不同的塑料和其他废料，必须将它们分开才能回收利用，而这是一个非常耗时耗力的过程。废品回收公司通常会把这些废弃物打包，运送到劳动力成本较低的国家进行回收，但是这些废弃物在运输的过程中，通常有一部分会泄漏到环境中。

大部分回收的塑料经过机械和热处理，被重新制成其他塑料产品。原则上，聚乙烯和聚丙烯等热塑性塑料可以通过再加工进行回收，但实际上，这些材料中的大多数在机械回收利用时其性能和价值会大打折扣。热固性塑料和树脂（例如某些聚氨酯和环氧树脂）不能轻易地通过化学或机械回收来再利用。

一些充满商机的塑料回收过程正在有效运作，例如，在欧洲，约一半的塑料牛奶瓶是由回收的高密度聚乙烯制成的，而这些材料部分来自旧的牛奶瓶。

将废弃物转化为同等性能的新产品的过程称为闭环回收。但是其他种类的塑料很难回收利用，或者只能变成价值比原始塑料低得多的产品，这种策略被称为开环或级联回收。

如果可以从中获取更多价值，那么从事塑料制造和废物处理的公司将更有动力收集塑料废物并对其进行再加工。一种办法为化学回收，即将聚合物分子分解为单体或其他较小的结构单元，并将其作为制造新塑料的原料。

化学技术具有提高机械和化学回收过程效率的潜力。通过两种方式可以解决塑料问题：一是找到更好的方法来处理我们今天使用的塑料，二是开发可以在将来更有效地被回收利用的新型塑料。

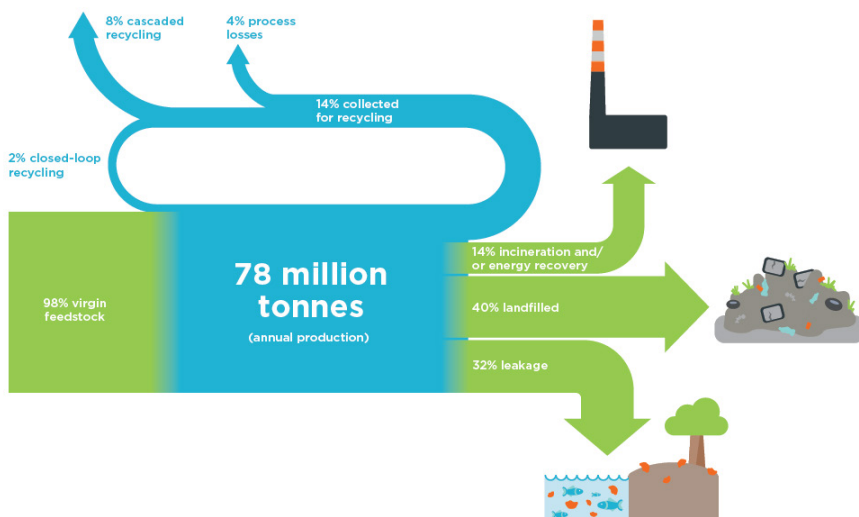


图 3.1 废弃塑料包装材料的归宿

2013 年，仅 14% 的废弃塑料包装材料被回收，仅 2% 被重新用于制造近似质量的产品（闭环回收），而 8% 被转化为低价值产品（级联回收）。数据来自 The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics, Ellen MacArthur Foundation (2016)

例如，研究人员可以拓展可化学回收塑料的范围，并帮助从这些材料中获取更多价值。新的化学技术还可以帮助直接和选择性地回收塑料混合物，从而避免昂贵且费力的分拣过程。

化学回收将在从废塑料中获取更多价值方面发挥关键作用，并且对于开创塑料循环经济至关重要（请参见图 3.2：塑料循环经济）。

有限的选择

各国的塑料回收策略不同，但是这些系统都依赖于一些共同的基本要素。从家庭、企业和其他收集点收集废塑料，然后将其运送到废物回收站，在这里将塑料分类为不同的聚合物类型。这有助于确保每种废物的回收路线都提供相对纯净的特定聚合物分子，使其适合于再加工成新产品。在加工设备中，塑料将被切碎并去除一些杂质。

机械回收方法是将塑料熔化并挤出，以便将其重新成型为瓶子、衣服纤维、地毯和家具等新的塑料产品。但是，通过机械回收生产的塑料，其性能通常不如用原始原料生产的塑料。例如，它们可能不那么坚固，或者可能褪色。由于回收产品的价值往往低于原始塑料，因此这种回收形式有时也称为“降级回收”。

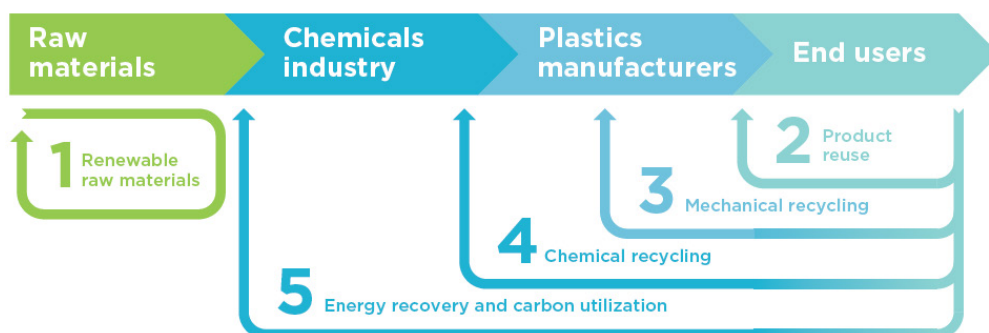
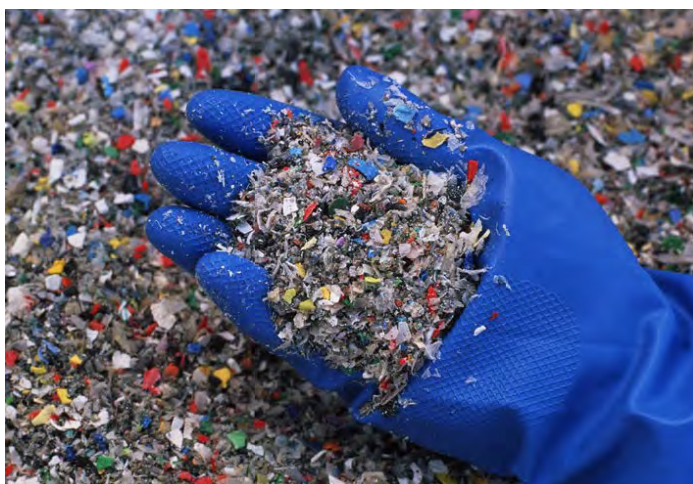


图 3.2 塑料循环经济

可持续塑料应基于可再生原料（1），并尽可能地多次利用（2）；一旦无法再使用，应进行机械回收来生产新的塑料产品（3），或进行化学回收以提供新的化学原料（4）；一旦这些选项都不再可行，就可以焚烧废塑料以产生能量，并捕获二氧化碳作为化学原料（5）。

改编自：Taking the European Chemical Industry into the Circular Economy, Accenture (2017).



在回收设施中切碎的废塑料

如果塑料废物不适合机械回收，则可以选择将其用于焚烧发电，特别是在二氧化碳可以被有效捕获而不是排放到大气中的情况下。但是，这种解决方案不能处理所有类型的塑料，例如，聚氯乙烯（PVC）在燃烧时会释放出酸，从而腐蚀焚化炉的管道，给能量回收系统带来问题。

化学回收可能是一种极好的且有望被广泛应用的替代回收方法，但目前在商业上可行的工艺相对较少。主要原因是某些塑料废物的组成复杂，此外塑料中的添加剂、改性剂使回收过程变得更加复杂。从根本上讲，解聚的化学原理还不是很清楚。几十年来，化学家们为开发将单体转化为聚合物的“正向”反应付出了巨大的努力，但将这些长链分解为较短分子的“反向”反应的相关研究还很少。这是未来方法学、理论和工艺研究的新的重点方向。

化学回收

目前可用的最常见的化学循环方式为热裂解过程，该过程是烃基聚合物的受控热分解。热裂解通常在 450~700°C 的高温下于惰性气氛中进行，以避免塑料发生燃烧。该工艺目前的局限性在于在大多数情况下它会形成蜡质、低聚物、不饱和物、芳烃和烷烃的混合物。换言之，它在单体生产方面选择性较差，却最适合于利用废塑料生产燃料。另一种选择是水热裂解，它通过催化裂解和蒸汽处理来分解塑料。该过程的温度稍低一些，为 350~550°C，但它还是会产生多种产品的混合物，只有一定比例的产品可以循环利用为塑料。以这种方式来回收混合的塑料废物还需要其他技术以处理添加剂。

这些过程大都能耗高而选择性较差，阻碍了更广泛的商业应用。更好的催化剂和化学工艺可以帮助加速降解或解聚反应，从而降低操作温度。探索高价值化学物质的选择性生产以及在未来将其回收为聚合物的单体也很重要。

早期的学术研究主要是探索催化聚乙烯回收的不同方法，这建立在对多种类型的塑料进行热分解或催化分解的悠久研究历史的基础之上（*J. Jpn. Petro. Int.*, 2016, DOI: 10.1627 / jpi.59.243）。通过级联催化反应，将两种不同的催化过程串联，来探索聚乙烯脱氢引入烯基是可行的。这些烯烃可以进行交叉复分解化学反应，从而可以生产一系列短链烯烃和低聚物。经过优化，该工艺可在 175°C 下完成，并且已在包括塑料瓶、食品包装材料和购物袋在内的实际塑料废物中得到应用（*Sci. Adv.*, 2016, DOI: 10.1126 / sciadv.1501591）。但是，利用此方法进行大规模工艺开发，还需要进一步的研究，包括大幅提高反应选择性、催化剂负载量、耐受性和成本控制。该过程仅适用于聚乙烯废弃物，因此在化学处理之前必须完全清除其他塑料，如聚丙烯和聚苯乙烯。该过程所用催化剂需要昂贵的稀有金属，因此需要探索替代的金属催化剂。

除此之外，还可以开发化学回收技术，将废塑料分解成比原始塑料更适合制造高价值产品的分子，这种策略称为“升级回收”。例如，可以将塑料分解成高价值的化学原料，或者可以对旧的 PVC 管进行化学改性以提高其耐热性，或赋予其抗菌性能（*RSC Adv.*, 2019, DOI: 10.1039 / c9ra05081g）。

化学分析在识别、追踪和分类塑料废物中的不同聚合物方面起着重要作用。X-射线光谱和红外光谱等技术可以区分不同的聚合物，但是这些方法可能无法检测某些塑料。为了满足对废物可追溯性日益严格的要求，将需要对化学和光谱标签进行更多研究，以便于塑料的回收利用并确保其可溯源性。



上：切粒的再生塑料，组分为 PET（聚对苯二甲酸乙二醇酯），通常用于制造液体容器，相对容易回收，可以重复使用；左下：塑料瓶上的 PET 回收标志；右下：塑料牛奶瓶重量的一半可由回收的高密度聚乙烯制成，材料部分来自于旧奶瓶。



即使采用改进的分类技术，也需要可用于处理和回收混合塑料废料的技术。催化过程可以帮助选择性地使混合废料中的某些塑料解聚，从而使分离更加容易。例如，PET 和聚碳酸酯在催化剂存在下以不同的速率与乙二醇反应。该反应在约 130°C 下使聚碳酸酯解聚，但只有在温度升至 180°C 时才发生 PET 的解聚反应。这意味着每种聚合物的单体都可以单独提取，从而提供了潜在的纯净化学原料来源，其价值远高于混合物提供的价值（Polym. Chem., 2019, DOI: 10.1039 / C8PY01284A）。此外，增容剂和嵌段聚合物也可改善混合塑料回收产物的性能，并实现更高价值的回收利用。

纸塑复合材料

在过去的十年中，纸塑复合材料在诸如咖啡杯和纸箱之类一次性物品中的使用有了显著增长，但是其中一些材料对回收利用提出了严峻的挑战。纸张本身易于回收，尽管这要耗费大量的能量和水。在欧盟，超过 70% 的新纸产品是由再生纸制成的。总体来看，世界每年生产约 4 亿吨纸，而包装材料约占纸张使用量的一半。

但是，纸张与诸如聚乙烯等塑料以及粘合剂的组合使用越来越多，以使其更坚固、耐油和防水。要回收这些纸塑复合材料，必须将纸纤维与其他组分分开，但是目前的工艺在这方面还不是很有效，在此过程中会产生很多废品并会污损机器。同时，欧盟发布的关于规范一次性塑料制品的指令将在 2021 年之前禁止许多一次性塑料产品（如果有替代产品的话），可能会无意间助长纸塑复合材料的使用。

化学家和材料科学家应专注于改善这些纸塑复合材料可循环利用性的方法。例如，与常规复合材料相比，生物衍生的疏水性纤维素酯和醚可用于使纸张具有疏水性，并且可促进从这些复合材料中回收纸纤维。原则上，这些下一代纸复合材料也可以代替食品包装中使用的某些聚乙烯。但是，它们需要具有常规塑料的性能，柔韧性强但不透氧、防液态水和水蒸气。如果它们不可回收，则要将这些新的复合材料设计成可堆肥的。解决这些挑战需要在塑料和造纸工业之间进行更多的合作，还需要科学地了解如何设计复合材料以提高性能。

结 论

人们普遍认为，回收塑料代价高且困难重重。但就回收的基本能源需求而言，与玻璃或钢等材料相比，塑料具有许多优势，这不仅因为大多数聚合物的典型解聚温度（最高温度）范围为100~600℃。但是，有关塑料回收和分解的科学问题亟需快速发展，应开发有助实现高效回收的必要技术。聚合物科学可以帮助解锁废塑料的价值，并改善回收过程。化学可以帮助开发技术，使其能够以低能耗和低 CO₂ 排放的方式回收更多种类的塑料。关键目标之一是开发更好的催化剂和工艺来进行回收处理，高选择性地生产可用于进一步聚合的单体。化学对于塑料可回收性的定性和定量也至关重要，有助于指导制造商、消费者和决策者的选择。

企业渴望在塑料的生产和回收中采用更可持续的方法。我们建议对化学回收技术进行研究，因为它有可能提供多种回收循环，而不会影响产品的质量。但是，塑料添加剂需要仔细考虑，因为它们可能会污染整个化学回收工艺，并且未来工艺的发展需要与材料性能要求相匹配，以确保更大比例的塑料得到回收。

尽管如此，几乎不可避免地会有一些塑料进入环境。开发更适合环境降解的新塑料可以减轻这种污染的影响（请参阅第4章：塑料的降解）。这项研究同样依赖于许多提高塑料可回收性的化学策略，例如通过引入化学基团为聚合物分子提供合适的断裂点。如此一来，可环境降解的聚合物也可促进循环再利用。



可降解塑料是减轻塑料污染影响的一种手段

第四章 塑料的降解

尽管已经有了一些可生物降解和可堆肥的塑料，但公众和工业界仍然对这些术语的含义以及这些降解过程所需的条件和时间周期感到困惑。需要进行研究以准确了解所有塑料在不同情况下如何降解以及它们降解产物的归宿。这些知识将帮助化学家设计使用寿命长但可按需降解的聚合物，并确保塑料的降解产物不会带来意外的环境后果。

引言

大多数塑料被设计得很耐用，以使它们在使用寿命内可以保持其结构和性能。但是在包装等应用领域，这种耐用性会造成污染，因为随意丢弃的废塑料会在环境中保留数年甚至数十年。同样重要的是要强调，对于某些应用，设计更耐用、寿命更长的塑料将是一种更可持续的选择，对此应加强探索。在某些情况下，允许塑料制品（例如可再填充包装）多次重复使用将比提供多个一次性包装制品更具可持续性。然而，存在一个根本问题，即不可降解材料在使用时还是可能会流入到环境中去。

设计一种使用寿命长并且在其寿命终结时可降解的塑料是一项重大挑战。可生物降解的塑料现已上市，并且已经针对许多行业和应用场景进行了开发。例如，最初开发的一些材料用于医疗植入物，这些材料能在患者体内缓慢分解。一些塑料最适合在工业堆肥设施中降解，它们通常采用与常规可回收聚合物相同的回收和处理设备；其他聚合物被设计为能在家用堆肥系统中分解。对于此类可降解聚合物，至关重要的是要了解降解需要什么条件、需要多长时间以及残留的分解产物。人们已经意识到当前的标准和测试方法无法预测复杂自然环境范围内的降解情形（R. Soc. Open Sci., 2018, DOI: 10.1098 / rsos.171792）。

随着我们使用越来越多的可降解塑料，其分解产物将对我们的世界产生更大的影响。需要进行研究以了解这些降解产物带来的后果，并确保它们不会以意外的方式改变环境，如促进以塑料为食的不同的微生物在土壤中大量繁育，或者改变土壤的 pH。预测和理解这些影响至关重要。

开发新型可降解聚合物为减少塑料污染物对环境的影响提供了机会。但是，必须对它们降解过程的基本化学机制以及该机制的长期后果有更深入的了解来为研究提供依据。这项研究还可以帮助制定可降解塑料的标准，从而可以更好地考虑其在实际情况下的行为。

塑料的分解

重要的是要认识到，生物衍生的聚合物（由从诸如植物等生物材料中提取的分子制成的聚合物）不一定具有生物可降解性。相反，许多可生物降解的聚合物实际上是由石化原料制备的。在制备可环境降解的聚合物方面，由于石化或生物基的原料都可以有效使用，因此对原料来源无需重点关注。

生物衍生的聚合物可能会提供机会，这可以使更多可持续的原料用来生产具有较低碳足迹的塑料。而可生物降解聚合物可以通过减少塑料在环境中的持久性来帮助解决另一个问题。同时考虑到这两个目标，由生物衍生并且可生物降解的聚合物看起来尤其具有吸引力。

按产量计算，最主要的可生物降解聚合物是聚乳酸（PLA）和聚对苯二甲酸 - 己二酸丁二酯（PBAT），其中 PLA 是由生物质生产的，而 PBAT 主要源自石化产品。其他常见的生物基和可生物降解塑料包括聚丁二酸丁二酯（PBS）和聚羟基脂肪酸酯（PHA）（见图 4.1：全球可生物降解和生物基塑料的生产）等。这些生物基或生物可降解聚合物的总产量在 2019 年约为 210 万吨，仅占整个聚合物市场的很小一部分。

与包装中使用的常规塑料相比，当前的可生物降解替代品需要改善其性能和降解条件。化学可以帮助改善这些可生物降解塑料的机械、热和流变性能，并找到更便宜地批量生产它们的方法。

随着生产规模的扩大，可生物降解聚合物将变得更便宜。

另一个挑战是，不同的材料需要不同的条件才能完全降解，包括不同的温度、微生物和湿度。某些塑料可能会在更广阔的环境中降解，但其分解速度在不同土壤、河流或海洋环境中会发生很大变化。各种各样的环境条件意味着很难设计出在任何情况下都能无一例外地降解的聚合物。

除了聚合物链的化学性质以外，聚合物链（或分层结构）之间的相互作用也是决定塑料是否可降解的关键因素。例如，PHA 形成了层状结晶域，直径约为 10 纳米，这些晶体片被非晶态区隔开，它们一起形成直径可能为 100 微米的称为球晶的晶粒，并最终形成塑料较大结构的构筑单元（参见图 4.2：塑料的结构）。因此，大块塑料材料的行为不同于单个聚合物分子，而是在各种物理尺度下表现有所不同，这或多或少会增加降解的难度。

塑料降解通常发生在不同的阶段，大块的塑料被侵蚀成较小的碎片，然后碎片中较长的聚合物链分解为分子量较低的短链分子。这些步骤取决于一系列物理和化学过程，例如风化和磨蚀、水、紫外线、氧气、热及各种化学机理或生物有机体（例如微生物）。最终，聚合物经历了完全的生物降解，形成可加工或易于代谢的小分子。在某些情况下，这种环境降解可能是处理塑料和减少塑料污染的最佳方法。然而，始终需要进行彻底的生命周期评估来为不同废物管理策略提供有益的比较。

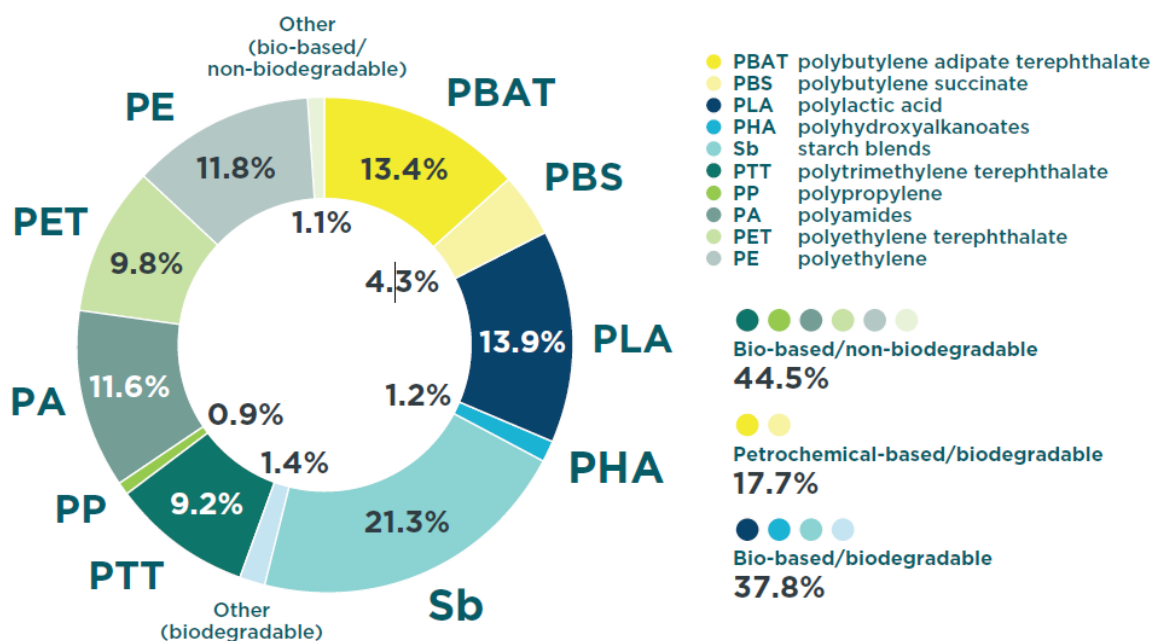


图 4.1 可生物降解和生物基塑料的全球产量

由生物基材料制成的塑料中大约有一半是不可生物降解的。两种主要的可生物降解塑料（PBAT 和 PBS）主要由石油化学前体制成。所谓的“生物塑料”中，只有略超三分之一是基于生物的并且是可生物降解的。数据来源：Bioplastics market data 2019, European Bioplastics (2019)

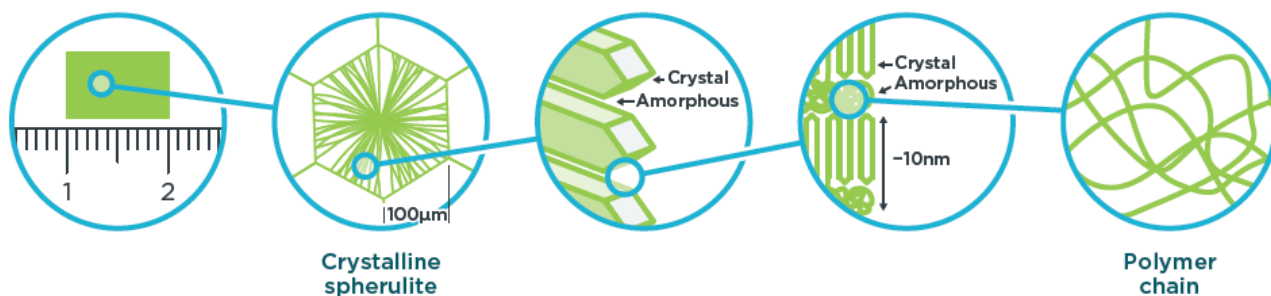


图 4.2 不同尺度下的塑料结构

塑料在不同尺度下具有不同的结构特征，其不会以相同的方式或相同的速率降解。塑料通常包含称为球晶的坚硬晶粒，其直径可以达到数百微米，并能增强材料强度。在这些球晶中，一些聚合物链高度有序排列为约数十纳米厚的结晶域，其被聚合物链更缠结并且通常更容易分解的无定形域所分开。改编自 Keiji Numata 的图。

为了设计新型环境可降解塑料，化学家可以将酶可以进攻的化学基团结合到聚合物中。但是研究人员还必须考虑这些酶如何接近聚合物分子，要将不同的结晶度或表面处理纳入考虑。有关聚合物降解的化学机理以及这种降解所产生残留物的进一步研究可以为开发过程提供指导。同时在自然环境以及实验室中研究这些过程也是至关重要的。

这类研究应确定降解产物的分子量和化学结构，但也应考虑中间分解产物，包括较短的聚合物链和纳米颗粒。我们还需要通过诸如体外酶测定法的生物分析手段来研究这些分子对活体生物的影响。

一个缓慢的过程

任何新的可在环境中降解的塑料都应在一定时间内完全吸收到环境中，而不会产生具有生态毒性的降解产物。确定此时间范畴将依赖于用途。现今烃基塑料的分解速度通常太慢，一旦塑料达到微米或纳米颗粒的大小，降解作用通常会停止，而这些微塑料可能会引起环境问题（请参阅第 1 章：塑料的影响）。

欧盟现行法规规定，如果在堆肥 12 周后，用 2 毫米孔眼的筛子过滤到的塑料重量不超过总量的 10%，则认为该塑料是可堆肥的。这意味着穿过筛子的成分可能包含塑料颗粒的微小碎片。如果将这种残留物施放到农田（这在大多数国家都很普遍（Sci. Adv., 2018, DOI: 10.1126 / sciadv.aap8060）），那么对于科学家来说，确定土壤微生物是否可以完成这些颗粒的后续分解就尤为重要。这还可能将一些永远不可能完全降解的材料与完全可降解的结构（例如氧化可降解聚乙烯）相混淆。

PLA 是一种完全可水解的聚合物，其降解产物乳酸是一种天然代谢产物，可以被生物降解为二氧化碳和水。但是，了解完全降解的时间周期很重要，并且定义可接受的降解速率将依赖于用途。例如，已证明野外的 PLA 在几个月内开始分解，但是一年后，可见的薄片状物质可能会残留，并且需要更长的时间才能完全降解。这表明需要进行更多环境测试以了解分解产物所耗费的时间和其最后的归宿，这将需要化学家与生物学家和生态学家更紧密地合作。它还需要从分子水平上了解聚合物的键合和结构，以及分解它们所涉及的机理。

塑料的降解

设计赋予塑料环境可降解性并不意味着将环境降解作为处理此类废物的默认选项。实际上，降解机制只是为社会增加了在塑料使用寿命结束后处置方式的可选项。例如，PLA 是一种易于解聚的脂肪族聚酯，因此可以通过闭环化学循环进行处理（ChemSusChem, 2019, DOI: 10.1002/cssc.201902755）。

由于酶通常在处理微晶方面不太有效，因此有可能通过使用设计有无定形区域但仍保留所需物理和机械性能 of 的聚合物来促进环境降解。将不同的聚合物混合在一起，或与其他材料制成复合材料，可以帮助无定形塑料在使用过程中保持强度。例如，支链脂肪族聚酯倾向于形成更多的无定形材料，其比另一种形态的微晶体降解更快。早期研究表明，将线形聚酯和支链聚酯共混可能有助于微调最终塑料的物理性能，使其在使用过程中仍然表现良好。

聚羟基烷酸酯（PHA）是另一类颇有前途的聚合物，它们来源于生物基材料又可以生物降解。PHA 的生产开始于由微生物合成聚合物，且聚合物占细胞干重高达 90%。已经有一些 PHAs 实现商业化生产，将来也可以使用替代的化学路线来生产这种材料。

脂肪族聚碳酸酯也具有作为可降解塑料的潜力，并且与传统的石化基聚合物相比，其碳足迹可能更低，因为它们可以通过环氧化物与 CO₂ 反应来制备（请参阅第 2 章：可持续的新型塑料）。这些聚碳酸酯的性能和制造工艺仍然需要优化，包括改进其热稳定性和机械强度。例如，已证明源自 CO₂ 的聚碳酸亚丙酯（PPC）膜对水蒸气的渗透性非常低，可用作农用覆盖膜（请参阅第 1 章：塑料的影响）。2018 年，在中国使用 PPC 覆盖膜进行的田间试验表明，其与传统聚乙烯膜一样可有效用于包括马铃薯和藜麦在内的一些农作物的栽培。PPC 膜用于棉花栽培时效果不佳，这主要是因为该膜在田间降解得太快，正在进行进一步研究以提高其强度。

在专业实验室中，正在探索各种各样的其他可降解聚合物，其中大部分研究集中在脂肪族聚酯、聚酰胺、聚碳酸酯和聚缩醛等方面。另一个需要研究的领域是使用改性氨基酸来制备仿天然材料（例如蜘蛛丝）的合成聚合物，或制造纤维和泡沫。



可回收邮件袋和可降解食品包装

结 论

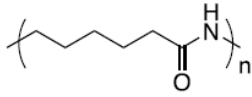
尽管这些新发明的聚合物具有巨大的潜力，但它们很难与已批量生产 60 年的常规石化聚合物竞争。因此，化学家面临的最直接挑战之一是为现有的可生物降解聚合物寻求降低成本和提高性能的途径，以帮助它们获得市场份额。这将需要新的单体合成路线、新的聚合催化剂以及增强这些塑料物理性能的新方法。例如，进行聚合物共混或增加聚合物链之间的交联度。在可降解聚合物开发过程中激励相关的基础研究和创新也很重要。这一探索性科学需要迅速开展，因为新材料技术路线需要对技术和工艺进行重大优化来生产新产品。

随着可降解塑料的日益普及，我们需要对不同降解类型以及降解形成的产物有更好的了解和更完善的信息。要在新兴的环境降解领域有所作为必将需要化学的投入，也需要制定该领域相关的标准和法规。作为这项工作的一部分，将结果有效地传达给公众至关重要，化学家必须参与推广活动，以提高公众对当前废塑料是如何管理的以及未来实现可持续管理的各种途径的认识。

有关研究人员是否要设计赋予塑料在化学回收设施、工业堆肥装置或环境中具有可降解性的决策，必须以生命周期评估和对分解产物归宿的充分了解为指导。同样重要的是要注意，在聚合物中引入可降解的化学键和化学物质可能会促进这些材料的循环利用，从而带来生产和后处理方面的双重便利。最终，化学家应该以“按需降解”为目标设计聚合物，以便可以最可持续的方式处理废塑料。

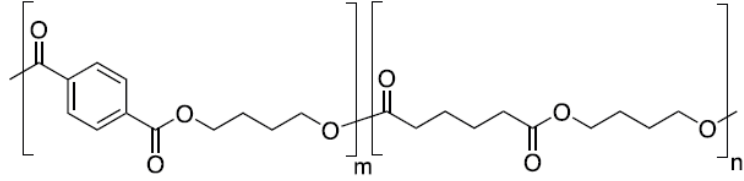
缩略语词汇表:

PA polyamide

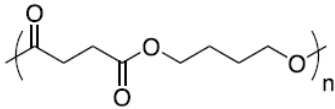


Illustrated with Nylon 6

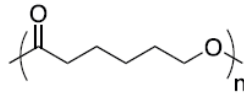
PBAT polybutylene adipate terephthalate



PBS polybutylene succinate



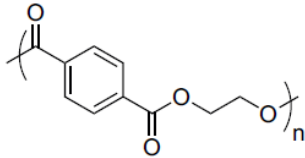
PCL poly ε-caprolactone



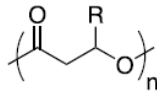
PE polyethylene



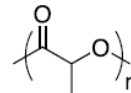
PET polyethylene terephthalate



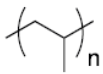
PHA polyhydroxyalkanoate



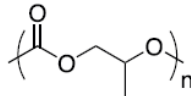
PLA polylactic acid/poly lactide



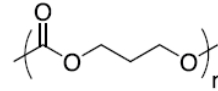
PP polypropylene



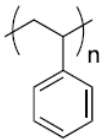
PPC polypropylene carbonate



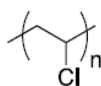
PPT polytrimethylene carbonate



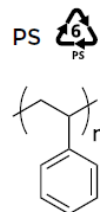
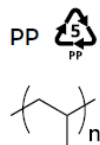
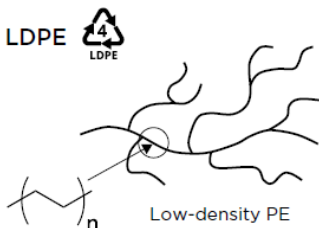
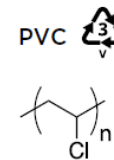
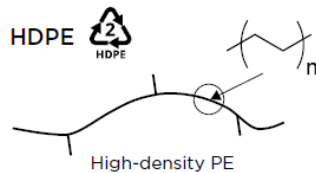
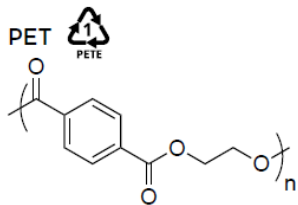
PS polystyrene




PVC polyvinyl chloride



常见聚合物的结构及其回收符号:



OTHERS  OTHER

Other plastics, including acrylic, acrylonitrile butadiene styrene, nylon, polycarbonate, and polylactic acid.

扩展阅读：

United Nations Environment Programme 'Biodegradable Plastics & Marine Litter: Misconceptions, Concerns and Impacts on Marine Environments' 2015. Available at wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/7468

Suschem 'Plastics Strategic Research and Innovation Agenda in a Circular Economy' 2018. Available at suschem.org/publications

PlasticsEurope 'Plastics – the Facts' 2019. Available at plasticseurope.org/en/resources/publications/1804-plastics-facts-2019

House of Commons Library, Briefing Paper number 08515 'Plastic Waste' 2020. Available at commonslibrary.parliament.uk/research-briefings/cbp-8515/

The National Academies of Sciences, Engineering and Medicine 'Closing the Loop on the Plastics Dilemma: Proceedings of a Workshop in Brief' 2020. Available at doi.org/10.17226/25647

CS3 代表名录

中国

李志波 (青岛科技大学)
黄 正 (中国科学院上海有机化学研究所)
吕 华 (北京大学)
王献红 (中国科学院长春应用化学研究所)
严昌荣 (中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所)
张 军 (中国科学院化学研究所)
帅志刚 (清华大学)
韩立冬 (中国化学会)

德国

Andreas Greiner (University of Bayreuth)
Markus Biesalski (Technical University of Darmstadt)
Christian Laforsch (University of Bayreuth)
Stefan Mecking (University of Konstanz)
Brigitte Voit (Leibniz Institute of Polymer Research Dresden (IPF))
Markus Behnke (German Research Foundation (DFG))
Hans-Georg Weinig (German Chemical Society (GDCh))

日本

Atsushi Takahara (Kyushu University)
Hirofumi Hinata (Ehime University)
Keiji Numata (RIKEN Center for Sustainable Resource Science)
Kotaro Satoh (Tokyo Institute of Technology)
Toshiaki Yoshioka (Tohoku University)
Satoshi Miyashita (Japan Science and Technology Agency (JST))
Ryoji Nakamura (Japan Science and Technology Agency (JST))
Mitsuo Sawamoto (Chemical Society of Japan (CSJ))

英国

Charlotte Williams (University of Oxford)

Matthew Davidson (University of Bath)

Andrew Dove (University of Birmingham)

Tamara Galloway (University of Exeter)

Jennifer Garden (University of Edinburgh)

Steve Howdle (University of Nottingham)

John Hand (Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC))

Jennifer Channell (Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC))

Sarah Thomas (Royal Society of Chemistry (RSC))

Stuart Govan (Royal Society of Chemistry (RSC))

Rebecca Quine (Royal Society of Chemistry (RSC))

CHINESE CHEMICAL SOCIETY



CHINESE
CHEMICAL
SOCIETY

中国化学会

北京市中关村北一街 2 号 www.chemsoc.org.cn