

Comprehensive Research Report on Chemical Recycling of Waste Plastics

废塑料化学循环 综合性研究报告

国家发展和改革委员会宏观经济研究院
经济体制与管理研究所

2024.03

执行摘要	01
一、化学循环的内涵	04
(一) 化学循环的定义	05
(二) 化学循环的特点	06
(三) 化学循环的产业发展定位	08
二、发展背景及重要意义	09
(一) 发展背景	10
(二) 重要意义	11
三、化学循环技术及产业发展现状	13
(一) 化学循环技术发展历程	14
(二) 化学循环技术发展现状	15
(三) 国内外废塑料化学循环实践进展情况	18
(四) 化学循环与“土法炼油”的区别	21
四、化学循环与现有处置方式的对比分析	23
(一) 化学循环生命周期效益分析	24
(二) 焚烧利用全生命周期绩效分析	27
(三) 填埋处置全生命周期绩效分析	30
(四) 三种处置方式对比分析	32
五、化学循环产业化发展的关键与推进路线	33
(一) 化学循环的难点及关键举措	34
(二) 推进路线图	36
六、推动化学循环产业化发展的政策建议	38
七、发展展望	40
联合研究单位及重点支持企业	42
致谢	43

Executive SUMMARY

执行摘要

当前，塑料污染成为全球关注的热点环境问题，各国正在就塑料污染国际文书进行谈判。中国高度重视塑料污染治理，近年来，政府有关部门连续印发了一系列政策文件，不断加大塑料污染治理力度。从中国、欧盟、日本等废塑料材料化回收先进国家和地区的实践来看，资源化价值较好的工程塑料、中空瓶体硬质包装类塑料等基本能够通过物理方式实现了较好的回收利用，而占塑料产量46%左右的软包装类、膜袋类等低值废塑料则受产品特性制约，基本不具备物理回收的技术经济条件，普遍以焚烧或填埋方式处理。

废塑料化学循环是指以废塑料为原料，采用化学方法将废塑料转化为一定比例的塑料单体以及副产其他化学组分，并进一步生产塑料与其他化工产品的过程。化学循环正在成为国内外塑料污染治理的新方向。

目前，化学循环并不能替代物理循环，主要针对物理循环所不能资源化利用的低值塑料垃圾，且仍处于产业化转化阶段，其塑料污染防治效果仍有待实践检验。

研究认为：

(1) 化学循环与物理回收是废塑料材料化循环利用的两大路径。其中，化学循环可以将物理回收无法实现的低值废塑料实现资源化利用，二者从理论上可以基本实现废塑料的材料化利用。

(2) 与物理回收相比化学循环具有显著优势：化学循环具有广泛的原料适应性，能够将物理回收无法有效经济回收的低值废塑料和复合包装，甚至填埋场或自然界中历史堆存的废塑料进行集中回收利用，转化为与使用原油生产具有相同品质的塑料原料，实现塑料工业的闭合循环发展，为全球塑料污染的最终解决提供新的选择。

(3) 化学循环可以将“白色污染”变为“白色油田”，为能源、资源安全提供有力保障：据测算，2022年我国产生废塑料超过6000万吨，其中焚烧或填埋量约4200万吨，如果其中的50%能够实现化学循环，就相当于开发了一个超过6000万吨的油田；如果能够对现有10亿吨的存量塑料垃圾进行回收利用，相当于低成本开发超大规模的“城市油田”。

(4) 化学循环正处于产业化发展关键阶段：经过几十年的技术发展，目前化学循环技术已经逐渐成熟，形成了以裂解法、解聚法、气化法为主的主流技术工艺，中石化、中石油、青岛惠城环保、万华化学、埃克森美孚、壳牌、巴斯夫、沙特基础工业等国内外大型企业集团纷纷开展废塑料化学循环产业化示范应用，推动废塑料化学循环进入产业化发展新阶段。

(5) 与焚烧和填埋相比化学循环综合效益更优：根据不完全测算结果，在无政府补贴的前提下，废塑料化学循环每吨净收益为850元左右，经济效益显著高于焚烧利用和填埋处置；以化学循环方式处置1吨废塑料相当于节约1.12-1.22吨原油，资源节约效益明显，高于焚烧利用方式的0.77吨标煤资源节约效益，填埋处置无资源节约效益；从环境效益看，化学循环环境影响潜值低于焚烧利用，填埋处置的环境影响则是长期的。

研究建议：

(1) 明确废塑料化学循环战略定位：将其作为构建我国塑料污染治理体系和能源资源战略安全保障的重要组成，纳入塑料污染治理政策法规体系、循环经济规划和废旧物资循环利用体系规划，并作为应对塑料污染的核心手段。

(2) 明确化学循环的产业发展定位：明确将化学循环作为废塑料回收利用的重要技术路线，在产业布局上，将化学循环项目作为资源综合利用项目，优先在化工园区集中布局和运行管理，在碳排放指标、用能指标、用地指标上优先保障，不纳入两高项目管理，不受化工项目产能限制。

(3) 建立与化学循环相匹配的废塑料分类回收体系：加快改革和完善现行生活垃圾分类制度，把低值塑料废弃物作为低值可回收物，在城乡居民生活垃圾分类环节增设废塑料专用回收箱（桶），建设城市低值可回收物分选中心，将低值废塑料从生活垃圾中分选出来，并交由化学循环企业加以利用。

(4) 推进化学循环示范试点工程建设：推动大型企业加大废塑料回收和化学循环利用的投资力度，建设一批废塑料化学循环示范工程，支持重点企业新建或利用现有装置开展工业化示范，鼓励上下游产业链融合发展的示范项目建设。

前景展望：

预计到2035年，中国塑料制品年产量将达到1.55亿吨，如果其中化学循环利用率达到30%，将使我国废塑料总体材料化回收利用率达到60%以上，每年通过化学循环将减少塑料垃圾近3600万吨，与废塑料焚烧相比减少二氧化碳排放2232万吨，节约石油资源约1.08亿吨，相当于再造两座大庆油田，产值将超过1600亿元。

预计到2035年，全球塑料产量将增加一倍，届时全球塑料年产量将达到7.34亿吨。如果通过化学循环，将全球废塑料回收利用率由目前的9%提高到30%，每年将新增循环再生塑料1.5亿吨，与废塑料焚烧相比减少二氧化碳排放9300万吨，相当于节约石油资源4.5亿吨，达到欧洲2022年6.63亿吨的石油消耗总量的67.8%，产值将超过6800亿元。

废塑料化学循环

综合性研究报告

报告作者

- 张德元 国家发展和改革委员会经济体制与管理研究所循环经济研究室 主任/副研究员
- 贾彦鹏 国家发展和改革委员会经济体制与管理研究所循环经济研究室 副研究员
- 李 刚 国家发展和改革委员会经济体制与管理研究所循环经济研究室 博士/助理研究员
- 陈怀锦 国家发展和改革委员会经济体制与管理研究所产业研究室 博士
- 满 娟 中国石油和化学工业联合会国际部国际交流处 处长
- 聂紫薇 中国石油和化学工业联合会国际部国际交流处 可持续发展专员
- 王永刚 中国物资再生协会再生塑料分会 秘书长
- 崔 璇 北京交通大学经济管理学院 实习研究员
- 托同霞 北京交通大学经济管理学院 硕士研究生

01

化学循环的
内涵

废塑料化学循环是指以废塑料为原料，采用化学方法将废塑料转化为一定比例的塑料单体以及副产其他化学组分，并进一步生产塑料及其他化工产品的过程。

化学循环的定义

国内外部分机构对废塑料化学循环的内涵进行了界定。其中，欧洲化学工业理事会（The European Chemical Industry Council, ECIC）认为，化学循环的目的是将废塑料转化为化学品，通过改变聚合物化学结构并将其转换为包括塑料单体在内的化学组分，并用作化工工业原料的过程^[1]；美国化学协会（American Chemical Society, ACS）认为，化学循环能够通过解聚和热裂解等化学过程将塑料分解为其组成部分，从而制成新的聚合物或用于其他用途^[2]；英国塑料联合会（British Plastic Federation, BPF）将

化学循环定义为，用于塑料废物管理中的一系列新兴技术，这些技术可以将难以物理回收或不能实现经济回收的塑料进行回收利用^[3]；我国生态环境部发布的《废塑料污染控制技术规范》中提出了废塑料化学再生的定义，即利用化学方法使废塑料重新转化为树脂单体、低聚物、裂解产物或合成气的过程^[4]。

本报告认为，废塑料化学循环是指以废塑料为原料，采用化学方法将废塑料转化为一定比例的塑料单体以及副产其他化学组分，并进一步生产塑料及其他化工产品的过程。

[1] Plastic Europe. Chemical Recycling[EB/OL], <http://plasticseurope.org/sustainability/circularity/recycling/chemical-recycling>. 2024-01-29.

[2] Zheng J, Arifuzzaman M, Tang X, Chen XC, Saito T. Recent development of end-of-life strategies for plastic in industry and academia: bridging their gap for future deployment[J]. Mater Horiz. 2023 May 9;10(5):1608-1624.

[3] British Plastic Federation. Chemical Recycling Briefing Paper[EB/OL], <https://www.bpf.co.uk/Publications/chemical-recycling-briefing-paper.aspx>.

[4] 中华人民共和国生态环境部. 废塑料污染控制技术规范[EB/OL], https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/gthw/qtxg-bz/202206/t20220607_984652.shtml.

化学循环的特点

目前，全球废塑料处置利用方式主要分为物理回收、化学循环、焚烧利用和填埋处置等四种方式。其中，物理回收和化学循环可以实现废塑料材料化回收利用，是未来塑料循环经济发展的两大主流技术路线。与物理回收相比，化学循环具有以下四个显著特点：

1. 化学循环原料适应性广

目前，国内外主流的物理回收技术工艺，均需要对废塑料按照材质进行精细分类，主要适用于材质相对单一、单体价值相对较高的塑料废弃物，难以应用于复合塑料制品、混杂塑料制品的回收利用，难以对软塑包装等低值塑料制品实现经济回收。化学循环原材料适应性则十分广泛，基本能够实现对生活产生的各类废塑料的回收和利用，且无需进行精细分类。特别是对于物理回收无法进行有效经济回收的低值废塑料和复合材质的塑料制品，如我们日常生活中常见的一次性塑料餐盒、塑料类快递包装袋、一次性塑料杯、一次性塑料刀叉勺、泡沫塑料、一次性塑料购物袋、各类商品塑料包装、农用地膜等，化学循环均具有很好的适应性。

2. 化学循环产品品质与原生产品基本一致

物理回收不改变塑料的分子结构，其改性后的产品为半均相结构，不能完全替代原生材料，普遍存在降级使用的情况，产品附加值较低。化学循环采用解聚、裂解等化学反应工艺，不仅能将其中的塑料成分转化为单体化合物，还能脱除塑料制品中的着色剂、阻燃剂等添加剂，最终聚合物与使用石油等化石原料生产的聚合物具有完全相同的品质和性能，可以替代原生材料，可用于包括食品接触包装在内的所有下游塑料制品的生产和使用，能显著提高再生塑料的经济附加值。

3. 化学循环具有较高的技术门槛

物理回收的核心工艺流程是对废塑料进行分选、破碎、清洗、熔融和改性等过程，技术工艺相对简单，属于传统再生资源回收利用产业，行业进入技术门槛较低。化学循环需要经过多个化学反应过程，工艺流程复杂，反应条件苛刻，安全生产条件极端苛刻，需要较多的专业技术人员、较高的研发投入、先进的技术装备、规范的管理以及较强的清洁生产和污染物综合治理能力，属于现代先进化工产业的重要组成部分，行业技术门槛普遍较高。

4. 化学循环项目规模普遍较大

物理回收单条生产线处理规模比较灵活，既可以“作坊式”小批量加工，也可以规模化化工厂加工。目前，我国从事废塑料物理回收的企业以中小企业为主，企业数量超过1.5万家，平均年处理规模仅有1200吨^[5]。化

学循环项目的原料处理设计规模一般在十万吨级以上，建设投资强度高，后端深加工生产特别是树脂还原过程需要依托现代化工产业的生产流程及装备。目前，国内外只有大型石化企业集团在开展化学循环产业化实践。

表 1. 废塑料处置利用方式对比

处置利用方式	方式简介	主要优势	主要劣势
填埋处置	废塑料直接填埋。	处置技术难度低，成本低。	造成资源浪费、土地侵占及环境二次污染，政府承担大量处置成本。
焚烧利用	废塑料直接焚烧或发电。	处置技术难度低，技术相对成熟稳定。	造成资源浪费，产生二噁英等污染物，政府承担大量处置成本。
物理回收	废塑料收集、分类、清洗、造粒，并用于产品生产。	减轻环境污染（土地、海洋、空气等）、减少温室气体排放，可以再生新产品。	可处置的废塑料品类有限，需前端精细分拣，分类回收难度大，普遍存在降级使用情况，不能无限循环。
化学循环	通过一系列的化学过程将废塑料转化为塑料单体及其他化学组分，进而生产新的塑料并副产其他有用化工产品。	减轻环境污染（土地、海洋、空气等）、减少温室气体排放，原材料适应性强，再生产品与原材料产品质量性能完全相同。	技术难度较高，产业链有待完善，尚处于产业化起步阶段。

[5] 数据来源：中国再生物资协会。

(三) 化学循环的产业发展定位

打通从废塑料到塑料的逆向流程，实现塑料的闭合循环，是塑料循环经济最理想的发展状态。因此，本报告认为：(1) 废塑料的材料化循环是最应优先发展的方向，其中能够实现物理回收的应优先物理回收，不能进行物理回收的应大力推动开展化学循环利用；(2) 焚烧发电是当前无法实现材料化利用的次优选择和兜底方案，是在物理回收或化学循环暂时不具备条件情况下的备选方案，不应被提倡和鼓励；(3) 填埋处置是防止塑料泄露到自然环境中的无奈之举，应当逐步减少或淘汰。

目前，在材料化循环方面，报废汽车、废旧家电等产品当中包含的塑料部件以及中空瓶体硬质包装类塑料等回收成本和回收难度相对较低、经济价值相对较高，已经通过物理回收的方式基本实现了材料化循环利用。对于物理回收难以解决的低值混合废塑料和复合材质废塑料，可通过化学循环的方式进行材料化利用，具体如表2所示。

综上，化学循环是与物理回收并行的废塑料材料化循环利用的两大路径之一，两条路径相结合可以基本实现废塑料的材料化利用。其中，化学循环能够实现废塑料的同品质原级再生，是构建闭合循环的绿色塑料工业体系的核心手段。

表2. 废塑料化学循环推广应用优先级

具体品类	优先发展级别
农用地膜、造纸废塑料。	★★★
生活垃圾日产生量小于300吨的小型城镇及农村地区生活垃圾中的废塑料；具备分选条件的城镇其他生活垃圾中的低值废塑料。	★★
垃圾填埋场中历史堆存的塑料垃圾。	★

注：表中优先发展级别并不代表化学循环技术的适用性分级，仅是从产业推进的难易程度进行划分，★越多代表优先发展次序越高。

废塑料化学循环

综合性研究报告



发展背景及 重要意义

化学循环可以将“白色污染”变为“白色油田”，为能源、资源安全提供有力保障：据测算，2022年我国产生废塑料超过6000万吨，其中焚烧或填埋量约4200万吨，如果其中的50%能够实现化学循环，就相当于开发了一个超过6000万吨的油田；如果能够对现有10亿吨的存量塑料垃圾进行回收利用，相当于低成本开发超大规模的“城市油田”。

发展背景

1. 塑料污染治理 将进入国际法律约束新阶段

塑料污染、气候变化、生物多样性是当前全球关注的三大公共环境问题。2022年，世界经济合作与发展组织发布的《全球塑料展望：经济驱动因素、环境影响和政策选择》指出，全球废塑料从2000年的1.56亿吨增至2019年的3.53亿吨，其中仅有9%得到材料化回收利用，19%被焚烧，约50%被填埋，剩余22%被弃置在无人管理的垃圾场、露天燃烧或泄露到环境中^[6]。目前，联合国正在就2024年底前达成一项具有国际法律约束力的塑料污染国际文书展开紧张谈判。随着文书的最终签订，塑料污染治理将形成具有国际法律约束力的国际协议。

2. 中国塑料污染治理 迫切需要新路径新突破

近年来，我国塑料制品生产量、消费量快速上升，塑料污染治理压力不断加大。我国高度重视塑料污染治理，国家发展改革委、生态环境部于2020年印发《关于进一步加强塑料污染治理的意见》，对新时期塑料污染治理做出全面部署。我国坚持塑料全生命周期治理，全面推动塑料源头减量、材料替代、规范回收和循环利用。2022年，我国废塑料材料化回收利用率达到30%^[7]，处

于国际领先水平。但与其他国家和地区一样，也遇到了材料化回收率难以进一步提升的发展瓶颈，迫切需要探索化学循环途径，以提高材料化回收利用率。

3. 化学循环成为国内外塑料污染治理新方向

鉴于在发展塑料循环经济、最终解决塑料污染等方面的巨大潜力，废塑料化学循环引起国内外高度重视。2018年1月，欧盟委员会发布《基于循环经济理念的塑料战略》提出，加强塑料垃圾回收和循环利用，推广废塑料化学循环。2021年11月，我国工业和信息化部发布《“十四五”工业绿色发展规划》，鼓励开展废塑料化学循环利用；2022年5月，生态环境部发布《废塑料污染控制技术规范》，提出废塑料化学循环适用于处理较难进行物理再生的废塑料；2023年10月，国家发展改革委等4部门发布《关于促进炼油行业绿色创新高质量发展的指导意见》，鼓励重点开发废塑料低能耗热解与净化预处理技术，加快废塑料化学循环工程试点示范。在相关政策的引导下，中国石化、中国石油、惠城环保等国内企业，以及埃克森美孚、壳牌、巴斯夫、沙特基础工业公司等跨国企业纷纷开展化学循环产业化探索和实践。

[6] OECD, Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options(Paris, OECD Publishing,2022).

[7] 数据来源：中国物资再生协会。

重要意义

1. 化学循环能够实现塑料工业 闭合循环发展

当前，废塑料材料化利用以物理回收技术为主，主要适用于品质单一、洁净程度较高的塑料废弃物，对于地膜以及快递外卖包装等低值混合废塑料则“无能为力”。化学循环基本能够高效回收大多数的废塑料，甚至可以高效回收皮革、部分纺织品等其他树脂产品，有效避免废塑料流向焚烧厂、填埋场甚至泄露到环境中。同时，化学循环能将废塑料转化为与原生塑料同品质的塑料原料，不存在降级利用的问题，从而构建起闭合循环、绿色发展的新型塑料工业体系，助力化工行业实现绿色转型和可持续发展。

2. 化学循环为塑料污染最终解决提供 根本出路

从源头治理看，产品的生态设计和材料的绿色替代仅能在一定程度上减轻而不能根治塑料污染。从末端回收处置看，中国、欧盟、日本等国家和地区的实践表明，受技术经济条件限制，基于物理回收的废塑料循环

利用，总体材料化回收率达到30%左右将会出现瓶颈，其他物理回收不能处理的废塑料成为塑料污染治理的最大难点和痛点。化学循环可以有效突破物理回收应用场景限制，突破废塑料材料化回收利用的发展瓶颈，从而为彻底解决塑料污染提供根本出路。

3. 化学循环 有助于能源和资源安全保障

化学循环可以对各种废塑料甚至填埋场或自然界中历史堆存的废塑料进行集中回收利用，从而减少对石油等原生资源的消耗，将“白色污染”变为“白色油田”，为能源、资源安全提供有力保障。据测算，2022年我国产生废塑料超过6000万吨，其中焚烧或填埋量约4200万吨^[8]，如果能够对其中的50%实现化学循环，就相当于开发了一个超过6000万吨的油田^[9]；如果能够对现有10亿吨的存量塑料垃圾^[10]进行回收利用，相当于低成本开发超大规模的“城市油田”，且腾出巨大的填埋空间和宝贵的土地资源。

[8] 数据来源：中国物资再生协会。

[9] 按照每生产1吨塑料需要消耗3吨石油进行测算。

[10] 数据来源：全国政协委员马永生：加强CCUS关键核心技术攻关，新华网，2022年3月9日，http://www.news.cn/politics/2022lh/2022-03/09/c_1128453428.htm。

4. 化学循环 助力碳达峰碳中和目标实现

循环经济对碳达峰碳中和的作用得到国际社会普遍认可，欧盟《绿色新政》将循环经济作为应对气候变化的重要手段，国务院发布的《2030年前碳达峰行动方案》也将循环经济助力碳达峰作为十大任务之一。据本报告综合测算，每化学循环1吨废塑料与

使用石油生产塑料相比，平均可以减少0.67吨二氧化碳排放。如果能对2022年我国填埋或焚烧的4200万吨废塑料全部实现化学循环，与使用原油生产塑料相比可减少碳排放2814万吨，还可避免因废塑料焚烧产生的大量二氧化碳排放，具有显著的碳减排效益^[11]。

[11] 数据来源：详见本研究报告第四章。



化学循环技术及 产业发展现状

经过几十年的技术发展，目前化学循环技术已经逐渐成熟，形成了以裂解法、解聚法、气化法为主的主流技术工艺，中石化、中石油、青岛惠城环保、万华化学、埃克森美孚、壳牌、巴斯夫、沙特基础工业等国内外大型企业集团纷纷开展废塑料化学循环产业化示范应用，推动废塑料化学循环进入产业化发展新阶段。

化学循环技术发展历程

化学循环技术始于上世纪60年代，由最初的以能源替代为目的的初始阶段，逐步发展到以塑料循环为目的的新阶段。

1. 以能源替代为目的的初始阶段

20世纪70年代起，全球爆发数次石油危机，导致原油价格暴涨，发达国家开始关注石油安全问题，积极寻找替代能源。这一时期，美国、欧洲、日本等国家的企业对废塑料裂解制油技术开展了大量研究，并建立了一批小规模生产装置，国内也出现大量“土法炼油”项目。但限于所产油品质量差、环境污染重、装置无法长期连续稳定运行等原因，这些技术没有广泛推广和应用。

2. 从能源替代到循环利用的过渡阶段

上世纪90年代以来，循环经济和可持续发展理念得到全球普遍认可。面对全球日益严重的塑料污染问题，强化塑料回收和循环利用成为国际共识和普遍选择。在物理回收之外，国内外一些企业将物理回收不能处理的混杂废塑料进行裂解以获取各类非标油品。这一阶段废塑料裂解技术装备有所提升，技术工艺有所完善，但并不以化学循环为产业发展目标，产业发展不规范，普遍处于灰色地带。

3. 以塑料循环为发展目标的新阶段

本世纪以来，国际社会对塑料污染的重视程度不断提高。例如，欧盟在2022年新修订的《包装及包装废弃物指令》中承诺到2030年欧盟市场的所有包装都要以经济上合理的方式重复使用或回收，并要求生产商在新的塑料包装中强制添加一定比例的再生材料。在此背景下，国内外大型石化集团纷纷加入到废塑料化学循环技术研发与产业化探索行列中，推动行业由获取油料为主进入以获取塑料原料为主要目的的绿色发展新阶段。

需要指出的是，虽然化学循环技术经历了漫长的发展阶段，但目前以实现塑料闭环循环为核心的化学循环技术仍处于产业化初期，尚未形成大规模的产业化应用。

化学循环技术发展现状

目前，从国内外技术研发和产业实践来看，成熟的化学循环方法主要有裂解法、解聚法、气化法三种。

1. 裂解法

废塑料裂解技术路线是指，在高温或催化剂的作用下将热塑性废弃塑料中的塑料聚合物裂解为液相中间产品，再经蒸汽裂解或者催化裂解制备成塑料单体原料的技术工艺过程。该技术路线具有一定的技术基础，开发难度相对较小、投资相对较少、原料适用性较好，因而被国内外多数公司所采用，已有工业化运行案例。废塑料裂解技术路线主要有非催化热裂解法和催化热裂解法两种工艺路线，其中非催化热裂解工艺技术成熟度较高，是当前的主流技术工艺。

(1) 非催化热裂解法：包括一般非催化裂解法、微波热解法。其中，一般非催化热裂解法是指将废塑料在无氧情况下加热至400-600℃，将废塑料转化为小分子混合烃的工艺。其热解油经蒸汽裂解/催化裂解等过程得到单体，单体再经聚合生成塑料，是目前的主流技术。此外，超临界水裂解法已经有公司进行商业性开发，试验装置已经存在。

微波热裂解法是指利用微波加热和含碳材料传导热量将反应体系加热至1000℃以上，使废塑料裂解为烯烃单体的工艺。此技术适用于不含聚氯乙烯（PVC）的混合废塑料，但存在微波反应器工程放大困难等问题，目前尚未实现工业化应用。

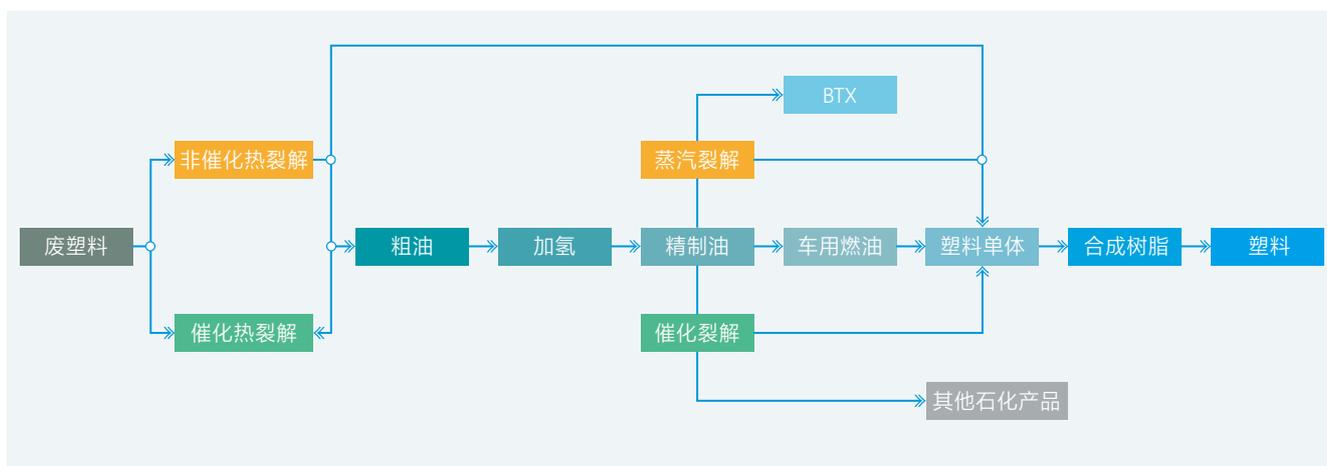


图 1. 废塑料裂解及后加工技术工艺路线

(2) 催化热裂解法：是指在催化剂的作用下，将废弃塑料进行热裂解生成油品或低碳烯烃，进一步生产塑料单体的过程。由于催化剂的作用，该技术路线裂解温度低(300-700℃)，反应速度快，产品品质因为催化剂的加入相较于没有催化剂有相对提升。反应后的催化剂部分可以进行再生循环利用，部分不可进行再生循环利用。但因催化剂消耗大，进料预处理过程复杂，该技术路线循环利用成本相对较高，产业化应用较难实现。

2. 解聚法

废塑料解聚技术路线是指，针对聚酯类塑料，通过水解、醇解、氨解、糖酵解、离子交换等各种化学手段，将具有特殊结构的塑料解聚生成塑料单体的技术路线。目前，解聚法比较成熟，已经进入到产业化发展阶段，国内外已经建设了一些工业化生产装置。

(1) 水解法：以聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)或聚氨酯(PU)等特定废旧塑料制品为原料，通过加入一定温度的过热蒸汽来生产多元醇(如乙二醇)或脂肪胺(如丙二醛(MDA))的塑料解聚方法。

(2) 糖酵解聚法：以PET等特定废旧塑料制品为原料，在催化剂的作用下，使废塑料与乙二醇发生反应生成苯二甲酸二环内酯(BHET)的塑料解聚方法。

(3) 醇解法：利用醇类的羟基(如甲醇)在高温甚至超临界状态下，解聚某些特定种类废旧塑料制品的方法，主要适用于PET类废旧塑料制品，其主要产物为二甲基色胺(DMT)、乙二醇等。

(4) 氨解法：废塑料与胺类及催化剂在一定温度和压力条件下发生的降解反应，主要适用于PET类废旧塑料制品，主要产物为BHET或者MEG+ Trephtalamide。

(5) 离子液体定向解聚制备聚氨酯技术：采用离子液体催化剂对废旧PET制品进行化学降解，产生低聚物并与PET醇解单体合成功能性聚酯多元醇，进而生产聚氨酯的技术路线。

(6) 聚对二氧己酮循环回用技术：聚对二氧己酮(PPDO)是一种脂肪族聚酯-醚，主要用于制备可降解手术缝合线。该技术可在150-250℃的减压条件下，将PPDO高效解聚为高纯度PDO单体，单体又可重新聚合成新的PPDO。

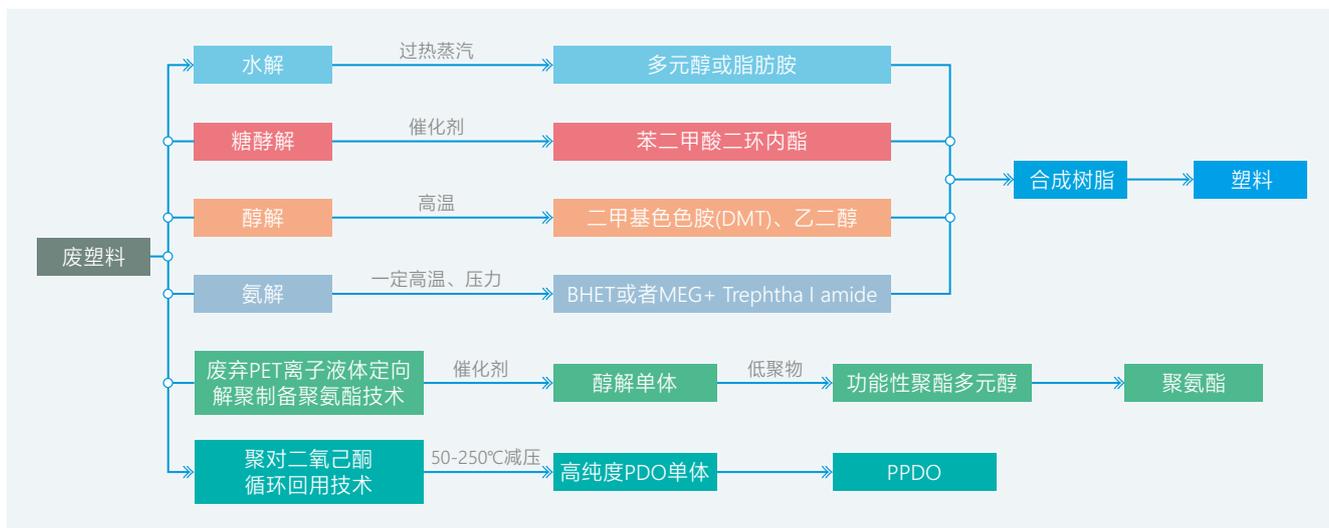


图 2. 废塑料化学循环解聚工艺

3. 气化法

废塑料气化技术路线是指，在较高的温度下（1400°C以上），借助氧气及水蒸气作用，将废塑料转化为一氧化碳和氢气，进而经过一系列化学过程生成塑料单体的技术路

线。该技术工艺无需对废塑料进行较为精细的预处理，可分解混杂废塑料。但由于该技术路线流程长、进料技术难度大、过程能耗较高，目前罕有工业化应用案例。

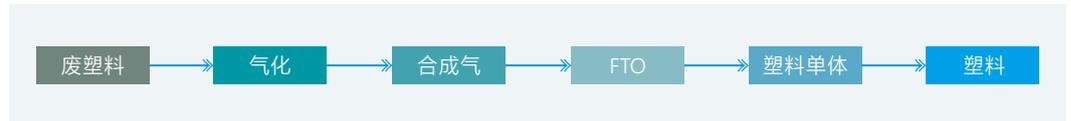


图 3. 废塑料气化及后加工技术工艺路线

三 国内外废塑料化学循环 实践进展情况

近年来，国内外塑料产业链上下游企业及研发机构纷纷开展废塑料化学循环技术的开发和探索，在一些关键技术及成套设备方面取得了显著进展及突破，各类技术已陆续完成产业化验证，逐步进入产业化应用阶段。

1. 国外实践进展情况

据不完全统计，全球超过60家化工企业正在研究废塑料回收解决方案^[12]，普遍认为化学循环是可以实现废塑料闭环循环的关键路径之一。2018年10月，艾伦·麦克阿瑟基金会（Ellen MacArthur Foundation）与联合国环境规划署（UNEP）联合发起“新塑料经济全球承诺书”行动倡议，超过850家企业和组织签署全球承诺书，宣布到2025年将累计使用500万吨再生塑料。2022年底，消费品论坛（Consumer Goods Forum, CGF）塑料废弃物行动联盟12家会员公司发布公开信，表达了其采

购符合环境保护措施的化学循环材料的需求。CGF对联盟成员公司更广泛的调查显示，到2030年每年需要80万吨化学循环材料。国际化工企业如埃克森美孚、巴斯夫、壳牌、沙特基础工业等积极开展化学循环实践，其进展如第19页表3所示。

2. 国内实践进展情况

近年来，中石化、中石油、惠城环保等部分石化和环保企业积极开展废塑料化学循环技术的研发和示范应用。部分企业不断创新本地化废塑料回收模式，积极探索低值废塑料、废弃农用地膜等的集中化规模化回收模式和自动化预处理设施装备，选择典型地区开展废塑料化学循环示范项目建设。其中，针对废弃地膜和综合性低值废塑料的化学循环工程项目已经进入工程建设阶段。具体进展情况如第20页表4所示。

[12] 张一鸣. 七位企业界代表委员热议政府工作报告[N]. 中国经济时报, 2023-03-06(003).

表 3. 国外企业废塑料化学循环实践进展情况

企业名称	实践进展情况
埃克森美孚	开发出将化学循环技术与石化生产设施进行整合的Exxtend™技术。截至2022年，位于美国的贝塘综合体已成功处理了5000多吨塑料废料，并已向客户交付了第一批经认证的循环聚合物。为了满足不断增长的客户需求，埃克森美孚正在评估利用化学循环技术为全球塑料生产创建循环解决方案的可能性，并利用现有生产设施快速扩展Exxtend™技术，以处理各种塑料废弃物。计划到2026年底，埃克森美孚希望在全球多个生产基地实现50万吨/年的产能。
巴斯夫	2018年开始实施ChemCycling®项目，在试验阶段，巴斯夫与客户共同生产出第一批原型产品，包括马苏里拉奶酪包装、透明冰箱组件和敏感用途的保温隔热箱。巴斯夫计划到2025年每年加工25万吨再生、废弃物回收原料，以取代化石原料。
壳牌	壳牌正在与价值链不同阶段的伙伴进行跨行业合作，从废塑料供应商、分拣商到热解油生产商，致力于将热解油业务发展商业化到盈利的规模。2021年，壳牌投资了欧洲裂解油技术公司BlueAlp，共同致力于开发、扩展和部署BlueAlp的技术。目前正在荷兰建造两套热解装置，总产能可处理约3万吨难以回收的塑料废物，预计将于2025年投入运营。其产出的裂解油将全部用以供应其在荷兰和德国的化工工厂。
沙特基础工业	与多家全球知名零售商和化工生产商合作，致力于推动塑料的循环使用，与价值产业链合作开展闭环项目。2019年推出了TRUCIRCLE™产品组合和服务，开行业先河推出了获认证循环产品。2021年初和塑料能源公司合作开始在荷兰建造一座新工厂，将废弃塑料转化为可回收的油，以生产聚合物。2022年，沙特基础工业公司提出了到2030年实现100万吨TRUCIRCLE产品的目标。
道达尔能源	与多家公司合作开展废塑料化学循环。与沙特阿美、沙特基础工业公司在中东北非地区成功将塑料废物中提取的石油转化为ISCC+认证的循环聚合物；与法国Paprec开发法国首个塑料薄膜先进回收价值链，计划于2024年投入运营；与New Hope Energy、霍尼韦尔、TotalEnergies、PureCycle Technologies等合作，将再生聚合物原料将其转化为原始品质的聚合物。
亨斯迈	基于循环经济，亨斯迈利用回收PET塑料化学循环再生技术生产出TEROL®泰络优®再生聚酯多元醇，可作为各类聚氨酯产品的原料，成分中回收PET含量最高可达60%。亨斯迈集团全球每年可回收PET废塑料相当于14.4亿个500毫升的PET塑料瓶，用于生产聚氨酯建筑保温材料、合成革、纺织纤维、家具海绵、工业胶粘剂等应用类产品。
霍尼韦尔	开展废塑料化学循环技术的研发和商业化工作，开发了塑料低温热裂解技术Upcycle™，采用先进专有反应流程设计，结合后端净化处理技术，裂解过程在没有催化剂的参与的工况下，达到85%以上的产油率，且产品以轻质油品为主，可直接用做乙烯裂解原料或炼油石化品生产（如催化裂化）原料。该技术已有商业化项目处于工程设计和建设阶段。
利安德巴赛尔	采用了其独家开发出的MoReTec技术生产Circulen Revive聚合物。该技术利用专有催化剂将物理回收难处理的废塑料分解成裂解油气原料，再用来生产可媲美原始树脂的新型聚合物。
SK化学	正在与合作伙伴共同完善热裂解工艺技术，并独立研究开发了降低裂解油杂质含量的处理工艺，探寻将废塑料裂解油作为石化装置原料。目前该项目已在韩国蔚山地区落地，即将开展建设。该项目拟通过化学循环法利用塑料废弃物，产出可以用于生产烯烃、芳烃的再生油品。
陶氏化学	与Mura Technology宣布将在美国和欧洲建设多个化学循环工厂，至2030年总计可增加每年60万吨的产能。所采用的HydroPRS™超临界蒸汽分解技术可将塑料，包括软包装以及多层结构塑料分解成原料油以及化学品，从而生产新的性能等同于原生塑料的产品。该产品可用于食品接触包装。
伊士曼	在2019年实现了碳再生技术（CRT）的商业化，在2020年实现了聚酯再生技术（PRT）的商业化。公司推出的Tritan™ Renew共聚聚酯，经“物料平衡”核算，含有高达50%的废弃塑料再生成分。
英力士	研发出塑料回收技术INEOS Infinia，使不易回收的PET转换成全新且品质纯正的PET生产原材料，减少PET的垃圾填埋。

资料来源：企业提供。

表 4. 国内企业废塑料化学循环实践进展情况

企业名称	实践进展情况
中国石化	已经完成实验室研发和百吨级中试试验，万吨级工业示范装置已立项获批，目前已完成首台套论证，正在开展项目环评、安评等项目审查，工程设计也已全面展开。本项目以新疆废地膜为原料，采用中石化自主知识产权 RPCC 热解技术，以及后加工技术，一期生产可持续车用汽柴油以及芳烃等石化产品，二期则扩能至二十万吨级，生产塑料单体，进而生产中石化优质 34-GL 耐候地膜，配合中石化开发的废地膜撬装式分选设备，彻底解决全新疆废地膜高值化资源化的循环利用问题。项目预计 2024 年年底前建成投产。
中国石油	与合作伙伴开展了废塑料裂解技术开发，打通了废塑料化学循环制化学品工艺流程，可将混杂废塑料转化为初级化学品，致力于推动废塑料化学循环工业化示范。
青岛惠城环保科技集团股份有限公司	已建成 100t/a 中试装置并稳定运行；揭阳市大南海石化产业园 200 kt/a 混合废塑料资源化综合利用产业示范项目，已完成立项、环评、施工许可等手续，进入工程建设阶段。本项目以低值混合废塑料为原料，利用深度裂解制化工原料技术（CPDC），将废塑料直接转化为三烯三苯化工原料，解决物理循环的无法循环利用的低值混合废塑料污染难题，实现垃圾中废塑料的高值循环利用，消除白色污染、减少碳排放。
万华化学集团股份有限公司	万华化学根据聚氨酯的分子结构特点和产业优势，开发的化学法聚氨酯回收工艺，可将废旧聚氨酯转化为高质量多元醇，并重新应用至聚氨酯发泡中，其中硬泡回收已完成中试实验验证，产品应用于冰箱保温层，通过了代表企业的测试；软泡回收已完成小试工艺开发，回收样品在海绵行业头部企业中通过了小试验证，目前正在进行中试装置的建造。
浙江佳人新材料有限公司	以 PET 化学法循环再生工艺流程已经实现了万吨级的产业化，其中老工厂 3 万吨产能已经运行约 8 年，新工厂 15 万 2023 年已经开始建设预计 2024 年下半年开始安装设备。

资料来源：企业提供。

④ 化学循环与“土法炼油”的区别

目前，社会上对废塑料化学循环普遍存在一些误解，将化学循环等同于传统的“土法炼油”。废塑料、废轮胎“土法炼油”由于技术工艺装备落后、环境危害较大，已经被国家有关部门明确列为淘汰类产业。尽管当前部分化学循环技术路线也需要经过废塑料裂解制油技术环节，但相较于“土法炼油”，化学循环在目标产品、实施主体、技术门槛、运营管理水平等方面存在显著差异。

1. 目标产品不同

“土法炼油”以获取燃油为目的，由于工艺设备简单，出油率低，炼出的油品质量差、杂质多，多流向锅炉燃料、船用燃料等非标燃料，其中部分会非法流入小加油站等。理论上，“土法炼油”可以获得部分“轻油”并用于塑料原料的生产，但其产率较低，普遍低于30%，造成资源浪费。而现代化学循环采用先进的石化技术，以废塑料为原料，以最大限度地获取塑料单体为主要目的，同时副产符合国家标准石化产品，碳氢元素有效利用率在70%以上，能够真正实现废塑料的闭合循环利用。

2. 实施主体不同

“土法炼油”的实施主体多为小规模废塑料、废橡胶炼油工厂或“小作坊”，企业固定资产投资普遍在500万元以下，每年废塑料综合利用规模普遍小于1万吨，产业始终处于“小散乱污”低端化发展水平。目前，全球化学循环项目实施主体基本是国内外大的石化企业和环保公司，技术研发能力强、资金实力雄厚、运营管理规范，单个项目年废塑料化学循环设计规模普遍超过10万吨，一体化装置投资普遍在5亿元以上，带动废塑料化学循环进入规模化发展新阶段。

3. 技术门槛不同

“土法炼油”生产技术工艺装备简单，多数装置只能间歇性生产，单条生产线处理规模小、运行效率低，且多为手动或半自动控制，缺乏必要的环境治理设施，环境污染物排放不达标，生产安全隐患大。化学循环技术工艺装备先进，均采用现代化、智能化、成套化技术工艺装备，能够实现连续稳定运行和自动化控制，设备寿命一般不低于20年，有完善的废水、废气、废渣等环保处理设施，环境排放和安全生产有保障。

4. 运营管理水平不同

“土法炼油”项目普遍未严格履行建设审批手续，生产过程中的三废处理无法达到环保要求，特别是间歇式生产条件下无法实现密闭、清洁联合生产，在粗裂解过程中会造成二噁英、氯化氢、VOCs等有害气体无组织排放，产生的废渣处理难度较大，产品

普遍达不到相关产品标准，以次充好现象突出。化学循环裂解项目基本布局在化工园区，后加工依托现有石化企业，经过严格的审批手续，配套环境处理设施和在线环境监测设施齐全，污染物完全可以实现达标排放，具有完善的管理体系，产品质量与原生塑料完全相同，可保障产业的绿色化、规范化发展。

04

化学循环与 现有处置方式的 对比分析

根据不完全测算结果，在无政府补贴的前提下，废塑料化学循环每吨净收益为850元左右，经济效益显著高于焚烧利用和填埋处置；以化学循环方式处置1吨废塑料相当于节约1.12-1.22吨原油，资源节约效益明显，高于焚烧利用方式的0.17吨原油资源节约效益，填埋处置无资源节约效益；从环境效益看，化学循环环境影响潜值低于焚烧利用，填埋处置的环境影响则是长期的。

由于各企业技术路线差异较大且考虑到商业秘密保护等，本报告中对废塑料化学循环、焚烧发电、填埋处置的生命周期分析数据清单，来源于文献数据、调查数据、专家提供等。在环境效益评价部分，考虑到数据可得性，废塑料化学循环的原材料为废聚乙烯；废塑料焚烧发电的原材料为废聚苯乙烯，废塑料填埋处置的原材料没有限制，因此环境效益的评价仅做参考，不具备严格比较意义。

化学循环生命周期 效益分析

废塑料化学循环过程的研究范围涵盖废塑料的回收、分选、预处理、化学循环（不包括利用塑料单体生产塑料制品过程）等环节，本报告中废塑料化学循环效益评价的系统边界如图4所示。

1. 经济效益评价

本报告所测算的成本指采用化学循环方式处置废塑料的运营成本，包括废塑料的回收成本、分选等预处理成本、化学循环项目的设备折旧成本，项目运行过程中的能耗成本以及环保成本等；收益指所有再生品的收益之和，包括最终各种塑料单体和其他化工产品等。

首先，利用城市环卫系统或者企业自建系统所回收的废塑料转运至预处理基地的成本为 $C^{transport}$ ，缩写为 C^t ；其次，由于回收技术的差异对废塑料材质及机杂要求有所不同，必要时需要对废塑料进行分选等预处理，

其成本为 $C^{retreat}$ ，缩写为 C^p ；支持化学循环系统运行所需的电、燃气、煤炭等能源输入产生的能耗成本为 $C^{energy-consumption}$ ，缩写为 C^{ec} ；化学循环过程中产生的污染物处理成本，即环保成本为 $C^{environmental\ protection}$ ，缩写为 C^{ep} ；设备折旧费用为 $C^{depreciation}$ 简称 C^d 。综上，废塑料化学循环的总运营成本为：

$$C+C^t+C^p+C^{ec}+C^{ep}+C^d$$

根据课题组企业问卷调查数据，目前废塑料从回收到化学循环的全过程总运营成本根据估算平均为3700元/吨。

根据估算，在当前技术水平下，主流技术工艺1吨废塑料采用化学循环技术工艺，其合成树脂的平均产率约为42%，芳烃、烷烃类平均产率约为17%，汽柴油平均产率约为10%，重质燃料油平均产率约为6%，液化气及焦炭收益忽略不计。本报告按合成树脂平均价格7500元/吨、芳烃平均价格6000元/吨，烷烃平均价格2500

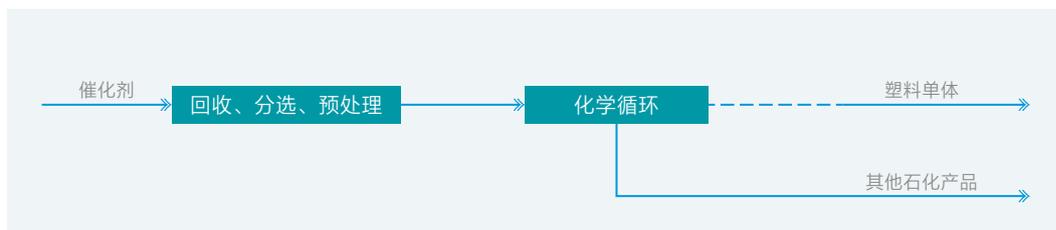


图4. 废塑料化学循环效益评价的系统边界

元/吨，汽柴油平均价格5500元/吨，重质燃料油平均价格3900元/吨的阶段性价平均出厂价测算，1吨废塑料化学循环产品产值约为4550元/吨。

综合成本和收益，废塑料化学循环的简单综合效益大约为850元/吨，政府给予100元/吨补贴的情况下，综合效益约为950元/吨。当废塑料原料价格高于850元/吨且政府不给予补贴时，化学循环将出现亏损。

2. 资源效益评价

按照原油到馏分油的提炼比例60%-70%进行测算，1吨废塑料相当于节约0.9-1.0吨石油资源，同时该技术路线会副产燃料气，1吨废塑料可产生0.033吨燃料气，可替代0.22吨的石油资源，综上，1吨废塑料化学循环相当于节约1.12-1.22吨石油资源。

3. 环境效益评价

废塑料化学循环过程中污染物的产生集中在预处理、裂解及油相分离环节，具体包括CO₂、CH₄、N₂O、HC（碳氢化合

物）、SO₂、NO_x、CO、烟尘等大气污染物，COD、SS（悬浮固体）等水环境污染物以及残渣等固体废物。以催化裂解处理1吨废聚乙烯为例，其具体环境排放清单如表5所示。

由于化学循环、焚烧发电、填埋处置等废塑料处置方式产生的具体环境污染物不同，为方便后续进行比较，本报告将各类污染物指标进行特征化，使指标与环境潜在影响建立联系。在污染物指标特征化之后，对环境影响进行标准化，以实现不同类型环境影响之间的比较。参考有关文献，确定各环境影响类型的当量系数。具体环境影响类型及其当量系数如表6所示。

废塑料化学循环的环境影响潜值（IR）由排放量（M）与对应的当量系数（C）决定，即：

$$IR(i) = \sum (M_j \times C_{ij})$$

其中，*i*为环境影响类型；*j*为污染物指标；*M*的单位为kg。

根据环境影响潜值的计算公式以及表5和表6中的排放量、当量系数，计算得到废塑料化学循环过程的环境影响潜值，如表7所示。

表5. 废塑料化学循环的环境排放清单

环境排放	污染物种类	排放量 (g)		
		预处理环节	裂解环节	总计
气体污染物	CO ₂	90000	561000	651000
	CH ₄	305.79	393.73	699.52
	N ₂ O	7.29	9.31	16.6
	HC	7.95	10.24	18.19
	SO ₂	838.60	1731.00	2569.6
	NO _x	371.57	3915.6	4287.17
	CO	9.40	899.00	908.4
	烟尘	443.86	571.51	1015.37
水体污染物	COD	22.41	28.85	51.26
	SS	23.13	29.79	52.92
固体废物	固体废物	13190	16990	30180

数据来源：伍跃辉. 废塑料资源化技术评估与潜在环境影响的研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2013.

表 6. 污染物指标特征化的环境影响类型

环境影响类型	污染物指标	单位	当量系数
全球变暖	CO ₂	kgCO ₂ eq/kg	1
	CH ₄		23
	HC		1700
	N ₂ O		296
臭氧耗竭	HC	kgCFC-11eq/kg	0.034
酸化	SO ₂	kgSO ₂ eq/kg	1.2
	NO _x		0.5
富营养化	COD	kgPO ₄ ³⁻ eq/kg	0.022
	NO _x		0.13
光化学氧化	CO	kgC ₂ H ₄ eq/kg	0.027
	CH ₄		0.006
烟尘&粉尘	烟尘	kg	以排放量计

数据来源：伍跃辉. 废塑料资源化技术评估与潜在环境影响的研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2013.

4. 二氧化碳排放水平评估

根据上文测算，1吨废聚乙烯催化裂解会产生0.651吨CO₂。为了更好地与原油生产塑料的CO₂排放水平相比，与焚烧发电的CO₂排放水平相比，本报告在该部分拓展废塑料化学循环环境效益评价的系统边界，将其拓展到生产聚烯烃和成品油燃烧的全过程，且该过程使用非单一材质的废塑料。引用中石化的公开研究材料，1吨废塑料基于多产化学品路线会产生2.38吨CO₂，低于1吨废塑料焚烧所产生的3吨CO₂排放水平，碳减排效果较为明显。

5. 小结

综上，化学循环是对废塑料进行资源化利用的重要技术路线，其经济效益、资源效益、环境效益及二氧化碳减排效益等方面均表现出较好的效果。在经济效益上，1吨废塑料的综合经济收益为850元左右；在资源效益上，1吨废塑料至少可替代1.12-1.22吨石油资源；在环境效益上，废塑料化学循环造成的全球变暖等多种环境影响潜值均处于较低水平；在二氧化碳减排上，与使用原油加工塑料相比，使用废塑料化学循环法可实现碳减排比例为22.0%。

表 7. 各类型环境影响潜值

环境影响类型	环境影响潜值	环境影响类型	环境影响潜值
全球变暖	702.93kg CO ₂ eq.	富营养化	0.56kg PO ₄ ³⁻ eq.
臭氧耗竭	0.00kg CFC-11eq.	光化学氧化	0.03kg C ₂ H ₄ eq.
酸化	5.23kg SO ₂ eq.	烟尘&粉尘	1.02kg 粉尘

焚烧利用全生命周期绩效分析

废塑料焚烧利用的资源化目的在于热能回收，进而利用热能发电。废塑料焚烧处置过程的研究范围涵盖废塑料的回收、预处理、焚烧环节，其效益评价的系统边界如图5所示。

1. 经济效益评价

废塑料焚烧利用的经济效益根据“成本-收益”模型进行测算。其中，本报告所测算的成本是指采用焚烧方式处置废塑料的运行成本，包括废塑料的回收及预处理成本、能耗成本以及环保成本；收益主要是指发电收益。

采用焚烧方式对废塑料进行资源化利用，首先，城市环卫系统将废塑料从回收点/站转运至垃圾焚烧厂的成本为 $C^{transport}$ ，缩写为 C^t ；其次，支持焚烧系统运行所需的电等能源输入产生的能耗成本 $C^{energy-consumption}$ ，缩写为 C^{ec} ；对焚烧过程中产生的灰渣（属于危废）、烟气等污染物处理成本以及大气排污费，即环保成本为 $C^{environmental\ protection}$ ，缩写为 C^{ep} 。综上，废塑料焚烧利用方式的总成本为：

$$C=C^t+C^{ec}+C^{ep}$$

根据调查数据，废塑料焚烧处置的总成本为317元/吨。详见表8。

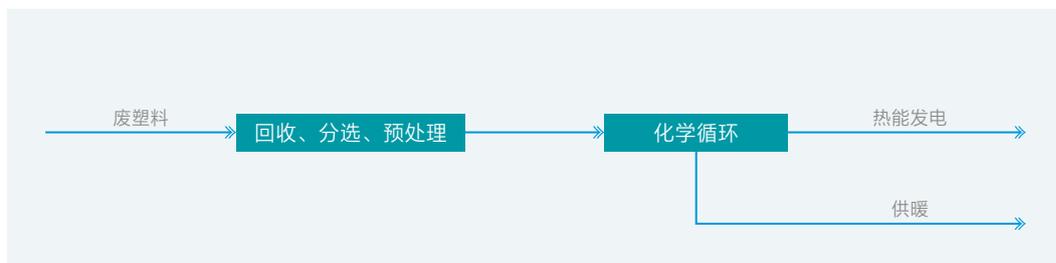


图5. 废塑料焚烧处置效益评价的系统边界

表8. 废塑料焚烧成本清单

单位：元/吨

	运输成本	能耗成本	环保成本	总成本
生活垃圾	30	198	287	515
废塑料	30	0	287	317

注：基于现有垃圾回收系统对废塑料进行回收处理。

焚烧厂的经济效益来源包括烟气热量回收发电、重金属回收和炉渣再利用。对于废塑料而言，由于其主要由C、H等元素组成，焚烧再利用的经济效益体现为烟气热量回收发电，不包含重金属回收和炉渣再利用。因此，废塑料焚烧资源化处置的经济效益为焚烧厂烟气热量回收发电的收益 $Regen_I$ ，即：

$$Regen_I = RPe \times Ae$$

其中， RPe 为电单价， Ae 为发电量。

假设废塑料中碳的高温焚烧氧化因子为100%，生活垃圾中废塑料的平均热值为34.5MJ/kg^[13]，垃圾焚烧发电转化效率为20%计算，1吨废塑料焚烧热量回收的发电量为1917KWh。按照目前我国生活垃圾焚烧发电价格政策，吨垃圾发电量280度以下按0.65元/KWh上网，超出的部分按当地燃煤发电上网电价，本报告按0.37元/KWh计算，则废塑料焚烧处置的收益为788元/吨。废塑料焚烧处置的经济收益为电价与以上成本的差值，在有政府补贴（包括0.65元/KWh的发电补贴和平均100元/吨的生活垃圾

处置补贴）的条件下，废塑料焚烧处置的经济收益为888元/吨；在无政府补贴的条件下，废塑料焚烧处置的经济收益为788元/吨。

2. 资源效益评价

根据上文，1吨废塑料可发电量为1917度，按照供电标准煤耗0.404kg/KWh进行折算，1吨废塑料焚烧发电可节约0.77吨标准煤。

3. 环境效益评价

本部分以废聚苯乙烯“共焦化”技术为例，在废聚苯乙烯破碎、与煤混合、入炉炼焦等阶段，会排放CO₂、CH₄、N₂O、HC、SO₂、NO_x、H₂S、CO、烟尘等大气污染物，COD、SS等水环境污染物以及残渣等固体废物，环境排放清单如表9所示。

根据环境影响潜值的计算公式以及表6和表9中的当量系数、排放量，计算得到废塑料焚烧处置过程的环境效益，如表10所示。

表9. 废塑料焚烧利用的环境排放清单

环境排放	污染物种类	排放量 (g)
气体污染物	N ₂ O	230
	SO ₂	28200
	CO	700
	NO _x	12100
	H ₂ S	270
	CH ₄	9600
	CO ₂	3507200
	HC	250
	烟尘	14400
水体污染物	COD	700
	SS	720
固体废物	固体废物	414140

数据来源：伍跃辉. 废塑料资源化技术评估与潜在环境影响的研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2013.

[13] 数据来源：谷琳, 何坤, 刘海威. 中国生活垃圾焚烧发电项目垃圾热值特性及其影响研究 [C]// 中国环境科学学会环境工程分会. 中国环境科学学会2022年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会论文集（三）. 中国恩菲工程技术有限公司, 2022:7

表 10. 废塑料焚烧的各类型环境影响潜值

环境影响类型	环境影响潜值	环境影响类型	环境影响潜值
全球变暖	4221.08kg CO ₂ eq.	富营养化	1.59kg PO ₄ ³⁻ eq.
臭氧耗竭	0.01kg CFC-11eq.	光化学氧化	0.077kg C ₂ H ₄ eq
酸化	39.89kg SO ₂ eq.	烟尘&粉尘	14.4kg 粉尘

4. 二氧化碳排放水平评估

根据上文测算，1吨废聚苯乙烯焚烧处置过程约产生3.51吨CO₂。若使用混合材质废塑料进行焚烧发电，根据中石化的公开研究，每吨废旧塑料焚烧发电产生的CO₂总量约为3.0吨。

5. 小结

焚烧利用技术路线是较为传统的废塑料处置利用技术，其减量化效果明显，在无政

府补贴的情况下经济效益为788元/吨，在有政府补贴的情况下，经济效益为888元/吨。在资源效益上，1吨废塑料可节约0.77吨标准煤。在环境效益上，废塑料焚烧利用造成的全球变暖等多种环境影响潜值相较于化学循环处于较高水平。在二氧化碳减排效益上，与采用原油加工塑料的二氧化碳排放水平（3.05吨/吨废塑料）相当，但高于化学循环法二氧化碳排放量（2.38吨/吨废塑料）。

(三) 填埋处置全生命周期 绩效分析

废塑料填埋处置过程的研究范围涵盖废塑料的收集、填埋环节，其效益评价的系统边界如图6所示。

1. 经济效益评价

单独对废塑料进行填埋处置需要进行额外的垃圾分类、清运、填埋，会产生额外的成本，不符合经济规律。在实际操作中，废塑料填埋处置即混入生活垃圾中进行填埋处置的过程。因此，废塑料填埋处置的成本与生活垃圾填埋处置成本相同，其成本包括城市环卫系统将废塑料从回收点/站转运至填埋厂的成本 $C^{transport}$ ，缩写为 C^t ；填埋场运营成本 $C^{operation}$ ，缩写为 C^{op} ；生活垃圾渗滤液处置等产生的环保成本 $C^{environmental\ protection}$ ，缩写为 C^{ep} 。综上，废塑料填埋处置的总成本为：

$$C=C^t+C^{op}+C^{ep}$$

根据调查，生活垃圾运输成本为30元/吨，填埋场运营成本60元/吨，环保成本为45元/吨，合计总成本为135元/吨。

在废塑料填埋处置收益评估方面，根据1989-2004年间的调研数据，废塑料填埋过程中的理化性质变化数据表明填埋场中废塑料并未发生明显的降解现象，其挥发分、固定碳和热值均无显著变化，仅有灰分含量相对变大（废塑料在填埋层中经过较长时间的物理和化学反应过程而粘附或嵌入其他杂质导致）。因此，废塑料填埋处置不产生收益。

综上，在有政府60~100元/吨的生活垃圾处置补贴的条件下，废塑料填埋处置的经济效益为-55元/吨（按补贴中间值80元/吨进行计算）；在无政府补贴的条件下，废塑料填埋处置的经济效益为-135元/吨。

2. 资源效益评价

将废塑料压实置于填埋场，减少了塑料垃圾的空间占用，但这种处置方式维持了废塑料的不可利用状态，并未减少对石油、煤炭等自然资源的需求，因此，废塑料填埋处置的资源效益几乎为零。

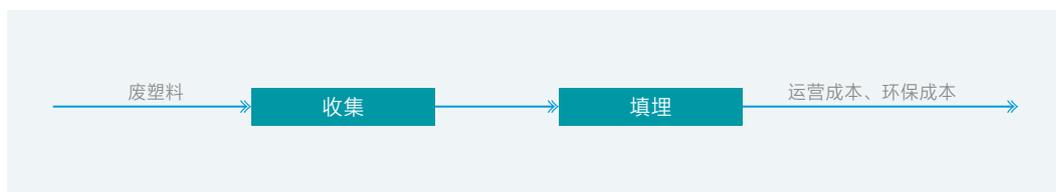


图6. 废塑料填埋处置效益评价的系统边界

3. 环境效益评价

与化学循环、焚烧处置相比，废塑料填埋处置过程中并未产生明显的污染物排放，但会产生间接的环境影响。随着填埋时间的延长，废塑料的表面粗糙度增加，表层塑料脱落形成微塑料，进入渗滤液中。实验数据表明渗透液包含 17 种微塑料，丰度为 24.58 颗/升。另外，废塑料会对填埋场的安全系数造成影响，主要由于填埋场中塑料含量的增加导致垃圾土的抗剪强度和粘聚力降低，进而导致填埋场边坡稳定性降低、泄漏风险提高。综上，废塑料填埋处置环境效益为负。

4. 二氧化碳排放水平评估

废塑料在自然条件下很难降解，进入填埋场的废塑料通常与厨余垃圾等其他生活垃圾混合填埋。由于塑料的降解速度极慢，降解过程大约持续 10-1000 年，平均 500 年，在填埋场这种密闭、无氧、压实的环境下降解时间将更长，且降解产物不可知。因此，本报告认为在短期内，可认为废塑料填埋处置的二氧化碳排放水平为 0。

5. 小结

与化学循环、焚烧利用两种废塑料利用方式相比，填埋处置的经济效益显著为负，即使在有政府补贴的情况下，其经济效益为 -55 元/吨。废塑料填埋处置资源节约效益几乎为 0，环境效益为负。短期内废塑料填埋处置的二氧化碳排放水平可认为 0。

④ 三种处置方式对比分析

根据全生命周期分析结果，废塑料化学循环的综合效益最好，焚烧利用次之，填埋处置最差。

1. 经济效益：废塑料化学循环在无政府补贴条件下每吨净收益为850元左右，焚烧利用在有政府补贴条件下为每吨888元，在无政府补贴条件下为788元，填埋方式不论有无政府补贴收益均为负。

2. 资源效益：以化学循环方式处置1吨废塑料相当于节约1.12-1.22吨原油，以焚烧方式处置相当于节约0.77吨标准煤，以填埋方式处置将不会带来资源节约效益。

3. 环境效益：化学循环技术的各类环境影响潜值均低于焚烧利用方式，填埋方式的环境影响则是长期的。在二氧化碳排放水平上，1吨废塑料化学循环、焚烧利用分别产生2.38吨、3.0吨二氧化碳。

此外，目前焚烧利用和填埋处置均需要政府给予一定的运行补贴，仅靠市场化力量无法实现稳定有效运行。

表 11. 不同处置方式对比

	LCA 评估			其他			
	经济效益	资源节约效益	环境效益	碳排放水平	厂房占地/m ²	设备投资/亿元	政府补贴
化学循环	无政府补贴： 850元/吨左右	1.12-1.22吨原油	较优	2.38吨/废塑料	7500	5000元/吨投资	暂无
焚烧利用	有政府补贴： 888元/吨 无政府补贴： 788元/吨	0.77吨标准煤	较差	3.0吨/废塑料	66700	50-60万/吨投资	(1) 发电补贴：280度以下0.65元/Kwh；超过部分0.37元/Kwh(2) 生活垃圾处置补贴：平均100元/吨
填埋处置	有政府补贴： -55元/吨 无政府补贴： -135元/吨	0	较差	0	133400	12.0万/吨投资	生活垃圾处置补贴：平均80元/吨

注：化学循环厂房占地面积为课题组所调研的多家企业提供数据的平均值；焚烧厂、填埋场占地面积为相关行业协会提供的行业实际平均值。



化学循环产业化 发展的关键与 推进路线

当前废塑料化学循环尚处于产业化发展初期阶段，推动化学循环产业规模化发展仍有一些关键问题需要解决。

化学循环的难点 及关键举措

1. 明确化学循环的产业定位

目前，国家有关部门对废塑料化学循环的发展缺乏顶层设计和统筹布局，产业定位不明晰。在项目审批立项等方面，化学循环往往作为小型化工类项目被严格限制，项目推进难。鉴于化学循环在塑料污染治理方面的巨大潜能，在行业定位上，应明确将化学循环作为废塑料回收利用的重要技术路线和节能环保产业的重要组成部分：一是将化学循环纳入国民经济行业分类；二是将化学循环项目纳入《产业结构调整指导目录》，列入“环境保护与资源节约综合利用”类；三是将化学循环项目作为节能环保产业纳入《绿色产业指导目录》。同时，综合考虑产业发展和政府监管需要，在产业布局上，将化学循环项目作为资源综合利用项目，优先进入化工园区集中布局和运行管理，在碳排放指标、用能指标、用地指标上予以优先保障，不纳入两高项目管理，不受化工项目产能政策限制。

2. 建立与化学循环匹配的废塑料回收体系

目前低值废塑料基本混入生活垃圾进行焚烧利用或填埋处置。根据调查，进入垃圾焚烧厂的生活垃圾中废塑料含量在20%左右，这部分废塑料能够成为化学循环的重要原料来源。在塑料污染治理国际约束不断强化的背景下，应旗帜鲜明地鼓励废塑料的材料化循环利用，逐步减少焚烧和填埋处置比例，建立与化学循环相匹配的废塑料回收体系。针对居民端废塑料，应进一步改革和完善现行生活垃圾分类体系，把低值塑料废弃物作为低值可回收物，在城乡居生活垃圾分类环节增设塑料废弃物专用回收箱（桶）；鼓励建设集中的低值可回收物分选中心，鼓励将低值塑料废弃物从生活垃圾中分选出来，并交由化学循环企业加以利用。针对废农用地膜以及其他产业端低值混杂塑料，应加快建立健全相应的集中收集和预处理体系，并实现与末端化学循环利用设施的统筹衔接。

3. 改进塑料包装设计以适应化学循环需要

由于产品特性的原因，PVC类塑料、有害添加剂的使用会给化学循环带来安全和产品质量风险。对此，部分化学循环工艺需要在预处理环节将含PVC的塑料包装剔除，即使预处理环节不进行分选也需要在后端化学分解过程中将氯元素去除，降低了化学循环的效益。因此，应积极推动包装物生产企业减少含PVC包装和有害添加剂的生产和使用，国家有关部门应考虑在部分领域禁止或限制PVC包装及部分添加剂的生产、销售和使用。应持续推行包装材料“易回收、易再生”设计，鼓励企业在塑料包装设计生产过程中尽量使用单一塑料材质的包装替代多种材质的复合包装。应鼓励和支持企业推广高强地膜、塑料软包装，使其更好满足化学循环原材料回收要求。

4. 加快化学循环关键技术产业化应用验证

目前，化学循环主要技术路线已经基本完成实验室开发与中试验证，部分技术路线已具备商业化应用条件，有待大规模产业化验证。在产业化应用过程中，应结合示范应用项目，进一步完善全产业链关键技术工艺，重点优化生活垃圾中废塑料高效分选装置，提高废塑料回收效率，降低分选成本；提升废塑料高效除杂和节能、节水等绿色环保预处理工艺技术；加快推动废塑料化学裂解技术升级，增强裂解过程的稳定性和连续性，加强智能化、自动化控制系统研发和应用，全面提升废塑料化学循环综合利用效率。

5. 建立化学循环溯源管理体系

目前国内外再生塑料应用企业普遍要求开展再生塑料溯源管理，确保原料来源的真实性并开展再生塑料量化管理。为提升化学循环产品的消费需求，需要建立完善废塑料化学循环全生命周期溯源管理体系，充分运用大数据、区块链等现代信息技术，构建可控制、可追溯、可考核、可认证的废塑料化学循环综合信息管理平台，开展废塑料化学循环认证。从事废塑料化学循环的企业应建立绿色供应链管理体系，对废塑料回收行为进行溯源管理，记录废塑料来源、数量、质量、能耗等关键信息，详细记录项目技术工艺、主要产品、产量、产品流向等信息，并接受有关部门、行业组织和产品应用企业的核查，防止弄虚作假。

推进路线图

基于废塑料化学循环产业的发展现状与未来趋势，本报告将化学循环产业化发展分为培育期（2024年-2025年）、发展期（2026年-2030年）、成熟期（2031年-2035年）三个发展阶段，各发展期应优先采取的措施如下：

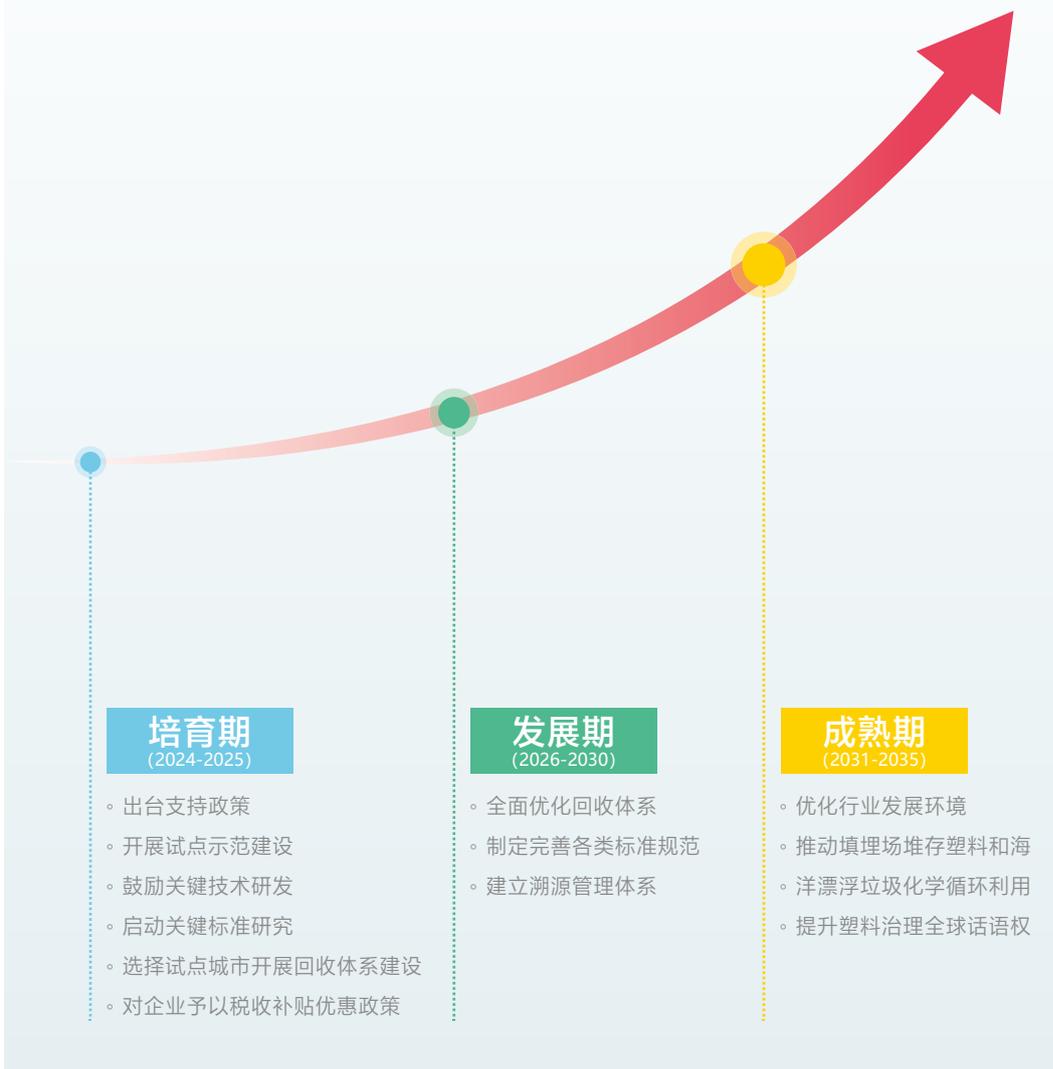


图 7. 废塑料化学循环推进路线图

1. 培育期应采优先采取的措施

以支持产业发展、示范试点建设、鼓励技术研发为核心，出台相关政策或行业发展指导意见，明确国家支持和鼓励废塑料化学循环产业发展。选择行业领军企业开展废塑料化学循环示范项目建设，启动化学循环关键标准研究制定，选择试点城市构建与化学循环相适应的废塑料回收体系，对有关企业和示范项目给予投资补贴、运营补助、税收优惠、土地保障等政策支持，支持企业承担国家重点科技研发项目。

2. 发展期应优先采取的措施

以规模化市场化应用和行业规范发展为核心，完善相应的产业政策体系。全面改革优化垃圾回收体系，建立与化学循环相匹配的废塑料回收体系。制定完善废塑料化学循环各类标准规范体系，明确行业原料收集与运输、厂址选择、项目建设、技术工艺、产品质量、三废处理等相关标准和规范。建立健全化学循环溯源管理体系，鼓励塑料制品生产和使用企业加大化学循环塑料原料的使用力度，并纳入企业绿色低碳发展战略。

3. 成熟期应优先采取的措施

持续优化行业发展环境，鼓励化学循环全产业链各类市场主体创新发展。结合国际塑料污染治理趋势和我国塑料污染治理进展，把废塑料化学循环作为应对塑料污染治理的核心举措，有序推动填埋场堆存塑料垃圾以及海洋漂浮塑料垃圾的集中清理和化学循环利用。积极参与塑料污染治理国际协作，在全球有序推动废塑料化学循环技术应用，全面提升我国塑料污染治理的全球贡献。



推动化学循环 产业化发展的 政策建议

第一，明确废塑料化学循环战略定位：将其作为构建我国塑料污染治理体系和能源资源战略安全保障的重要组成，纳入塑料污染治理政策法规体系、循环经济规划和废旧物资循环利用体系规划。第二，健全政策支持体系：将化学循环项目建设纳入中央预算内投资支持范围，享受再生资源行业增值税即征即退、所得税优惠等税收优惠政策。第三，推进示范工程建设：推动大型石化企业加大废塑料回收和化学循环利用的投资力度。第四，鼓励回收利用协同发展：以化学循环龙头企业为核心，发挥行业引领作用，联合上下游企业打造废塑料化学循环利用产业生态体系。第五，加强国际合作与交流：积极参与全球塑料污染治理，主动参与全球塑料污染防治规则制定，推动国际领域科研与技术合作。

1. 加强统筹与顶层设计

明确废塑料化学循环战略定位，将其作为构建我国塑料污染治理体系和能源资源战略安全保障的重要组成，纳入塑料污染治理政策法规体系、循环经济规划和废旧物资循环利用体系规划。出台促进废塑料化学循环产业发展的指导意见和发展规划，完善废塑料回收体系建设、生产环节污染控制、产品质量、追溯认证、再生利用等系列标准体系，加强化学循环项目准入管理，明确前置审批条件，防止低水平竞争和重复建设，培育形成稳定的化学循环产业生态。

2. 健全政策支持体系

将化学循环项目建设纳入中央预算内投资支持范围，享受再生资源行业增值税即征即退、所得税优惠等税收优惠政策。将废塑料回收网点、分拣中心建设等纳入中央和地方财政补贴支持范围。将废塑料化学循环纳入国家科技创新体系，加大支持力度，积极开展废塑料化学循环技术研发与示范应用。建立化学循环产品追溯和认证体系，将化学循环产品纳入绿色产品范围，加大政府采购力度，鼓励企业和消费者优先使用化学循环原料和产品。

3. 推进示范工程建设

推动大型石化企业加大废塑料回收和化学循环利用的投资力度。建设一批废塑料化学循环示范工程，支持重点企业新建或利用现有装置开展工业化示范，鼓励上下游产业链融合发展的示范项目建设。鼓励地方政府、环卫企业与废塑料化学循环企业合作，建立与化学循环相匹配的低值废塑料回收和专业

化分选体系，建设废塑料集中分选中心，提高自动化分选水平。鼓励在新疆、甘肃等地膜使用集中地区开展废旧地膜回收、分选和化学循环项目建设。鼓励和引导纸浆厂（造纸厂）将分选出的塑料垃圾与化学循环企业合作，开展化学循环示范应用项目建设。

4. 鼓励回收利用协同发展

以化学循环龙头企业为核心，发挥行业引领作用，联合上下游企业打造废塑料化学循环利用产业生态体系。鼓励化学循环企业向原料回收环节延伸，与专业回收企业合作建立与废塑料化学循环配套的塑料垃圾回收分选体系，促进废塑料收集、预处理与化学循环一体化发展。鼓励废塑料裂解企业与石化企业耦合发展，推动废塑料裂解制塑料一体化发展，为下游企业提供定制化、规范化、绿色化、标准化废塑料回收利用一体化综合解决方案，构建闭合发展的塑料循环产业体系。

5. 加强国际合作与交流

积极参与全球塑料污染治理，主动参与全球塑料污染防治规则制定，推动国际领域科研与技术合作。将塑料污染防治作为“一带一路”倡议各国双边及多边环境合作的主要内容，分享中国塑料污染治理的理念和实践，促进知识共享、技术交流、能力建设。鼓励有条件的化学循环企业走出去，与“一带一路”沿线国家合作开展塑料污染治理。加强与国际化工企业合作，鼓励合作开展化学循环示范工程建设。积极参与国际组织海洋塑料垃圾清理与化学循环利用。

废塑料化学循环

综合性研究报告

07

发展展望

当前，塑料污染治理是全球性难题，特别是在国际塑料公约谈判加快推进的背景下，废塑料化学循环技术具有广阔的应用前景和推广潜力，已经成为石化行业未来绿色发展的战略制高点。随着技术的不断创新和产业化实践的不断探索，废塑料化学循环将具备越来越高的经济性和可行性，有望为塑料污染治理提供全新的解决方案，真正实现塑料的闭合循环利用。

从中国废塑料化学循环发展潜力来看：根据工业和信息化部有关数据，2022年我国塑料制品产量为7771.6万吨。根据中国物资再生协会有关报告，2022年我国产生废弃塑料6000万吨，其中物理回收量仅1800万吨，占比30%，其他均采用焚烧或填埋方式处置。预计到2035年我国塑料制品年产量将达到1.55亿吨，如果其中化学循环利用率达到30%，将使我国废塑料总体材料化回收利用率达到60%以上，每年通过化学循环将减少塑料垃圾近3600万吨，与废塑料焚烧相比减少二氧化碳排放约2232万吨，节约石油资源约1.08亿吨，相当于再造两座大庆油田，产值将超过1600亿元。

从全球废塑料化学循环发展潜力来看：根据欧洲塑料制造商协会（Plastics Europe）的分析数据，预计到2035年，全球塑料产量将增加一倍，届时全球塑料年产量将达到7.34亿吨。如果通过化学循环将全球废塑料回收利用率由目前的9%提高到30%，每年将新增循环再生塑料1.5亿吨，避免被焚烧、填埋或泄露到自然环境中，与废塑料焚烧相比减少二氧化碳排放9300万吨，相当于节约石油资源4.5亿吨，将达到欧洲2022年6.63亿吨的石油消耗总量的67.8%，产值将超过6800亿元。根据OECD的统计数据，到2017年全球约有53亿吨废塑料被遗弃在垃圾填埋场或自然界中，如果能对其中的50%进行化学循环，就相当于开发了一个近80亿吨的油田，潜力巨大。

Joint Compilation UNITS

联合研究单位及重点支持企业

联合研究单位

中国石油和化学工业联合会
中国物资再生协会再生塑料分会

重点支持企业

中国石化石油化工科学研究院
中国石油石油化工研究院
青岛惠城环保股份有限公司
深圳市绿环再生资源开发有限公司
壳牌（中国）有限公司
埃克森美孚化工商务（上海）有限公司
欧莱雅（中国）有限公司
巴斯夫（中国）有限公司
沙特基础工业公司

Acknowledgements

致谢

本报告在编写的过程中，张哲民、侯研博、甄栋兴、雷俊伟、张秋燕、伍杨、彭敏、侯聪、史兆龙、单雪菲、蔡琳嘉等相关专家学者，在资料收集、案例调研、报告编写等过程中给予了大力帮助，为本报告的形成发挥了重要作用，在此表示诚挚的感谢！

同时，本报告在编写过程中参考了大量国内外文献和报告，感谢相关人员在低值可回收物领域开展的卓越的工作，为本报告的编写提供了重要支撑！