

“N+1”模式：废塑料化学循环未来发展产业模式分析

——科茂化学回收研究院 魏思凯

废塑料化学循环¹作为解决塑料污染、推动石化及材料领域低碳循环转型的关键技术，已获得全球广泛认同与推广应用，正处于蓬勃发展阶段，预计到2030年，全球化学循环产品的需求量将超过1000万吨。欧洲已有数万吨产能处于运行状态，全球范围内在建产能超过五百万吨，其中中国有约一百万吨产能在建设中。

现阶段行业内普遍采用“质量平衡”模式。由于目前化学循环产能较少、石化企业现有加工装置较难进行大规模改动以及下游需求十分旺盛，“质量平衡”模式成为化学循环行业发展早期的必然选择。科茂化学回收研究院认为，该模式本质上是人为创造的规则，是因现实条件的限制而采取的权宜之计，将来随着化学循环产能不断增长、法律法规和认证体系不断完善、下游客户要求不断提升，该模式及其伴生的认证规则有可能会面对较大的市场挑战。而实现“全量循环”的“N+1”模式，凭借其潜在优势，可能会成为未来产业模式的重要发展方向。

¹ 本文中废塑料化学循环特指聚烯烃类塑料，缩聚类塑料未做阐述。

一、现行产业模式分析（“质量平衡”模式）

1.1 模式定义与流程

1.1.1 定义阐述

“质量平衡”模式是指将一定质量的废塑料化学循环中间产品（主要是热解油）投入现有石化装置中，与石油基中间产品（如石脑油、VGO）进行掺混加工，最终得到原生品质新树脂及其他原生品质低碳循环产品，依据质量平衡的原理，将产品中的一部分认证为循环产品的废塑料化学循环运行模式。

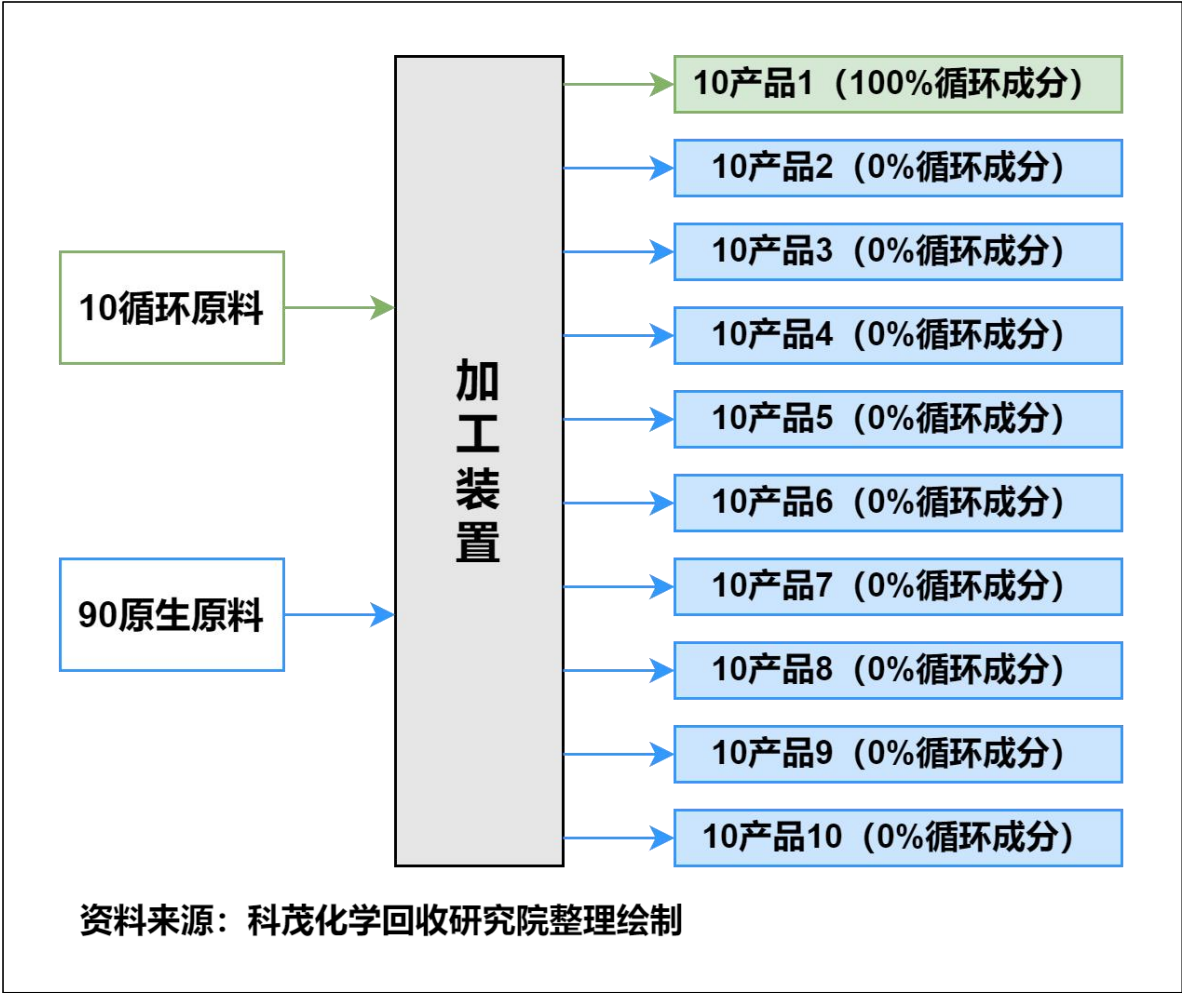
这种模式通过对原料投入和产品产出的质量追踪与计算，实现对化学循环产品的认证和标识，是目前废塑料化学循环行业在发展初期广泛采用的一种重要模式。

1.1.2 历史背景

质量平衡最早在可持续能源方面得到应用。2009年，欧盟颁布《可再生能源指令》，要求制定强制性的国家目标，到2020年，能源消费中可再生能源占比达到20%。

对于能源生产商来说，因为当时的可再生能源产量很少，建立专门加工可再生能源的新工厂需要大量投资，但可再生能源的价格相较于传统能源不会有很大提升，使得这种转变在经济上面临巨大挑战，商业风险过高。为解决这个问题，利用现有炼油厂来加工可再生原料、生产可再生能源，成为主要的解决方案。但现有炼油厂的规模远远超出了可再生原料的供应量，因此炼油厂

只能将可再生原料与化石原料混合在一起加工，再将可再生成分按照一定比例分配给特定的产品，使得可再生能源在经济上和技术上变得可行。这种可再生原料到产品的生产方式和计算方式被称为“质量平衡”。



正是由于质量平衡的应用，使得欧洲的可再生能源的消费占比从 2010 年的 12.5%快速提升至 2022 年的 23%，并且于 2023 年进行了《可再生能源指令》的修订，目标到 2030 年可再生能源消费占比至少达到 42.5%。

1.1.3 流程拆解

在可再生能源领域，欧洲凭借质量平衡模式积累了丰富的应用经验。如今，废塑料化学循环领域面临着与当年可再生能源领域同样的问题：产能较少，且化学循环中间产品可以借助炼油厂现有装置进行加工。因此，该模式自然而然地在化学循环领域中得到应用。接下来，科茂化学回收研究院将会详细阐述该模式在化学循环领域的运转流程。

（1）废塑料加工成热解油：废塑料化学循环工厂将收集到的各类废塑料，通过一系列物理和化学处理工艺，如粉碎、清洗、热解等，转化为塑料热解油。热解过程中，废塑料在高温、无氧或少氧环境下分解，大分子链断裂，生成相对分子质量较小的热解油，其成分和性质与传统石油基油品有一定相似性，但杂质含量、馏程等指标可能存在差异。

（2）热解油进入炼油装置：热解油被运输至石油炼化企业。炼油厂的规模一般在数百万吨至上千万吨，而目前化学循环产能相对较小，难以支撑起独立的炼油厂，所以需要借助现有炼油厂的装置进行后续加工。

（3）与石油基原料混合加工：热解油进入炼油厂装置，如原油蒸馏、蒸汽裂解、催化裂化等。在进入装置前，需要根据热解油的杂质含量以及装置对原料的要求，确定热解油与原生原料的混合比例。例如，若某加工装置对油品的有机氯含量要求为不高于 5ppm，而热解油的有机氯含量为 200ppm，而石油基原料的有机氯含量为 1ppm，那么就需要按照约 50:1 的比例进行掺混，以保

证混合后原料的有机氯含量符合装置要求。若热解油杂质含量过高，可能还需要增加净化环节，通过吸附、蒸馏、萃取等方法去除杂质，这不仅需要额外投资建设净化设施，还会增加生产流程的复杂性和成本。

（4）通过质量平衡法认证循环产品：混合原料在炼油厂装置中经过一系列复杂的物理和化学反应，转化为多种产品，包括乙烯、丙烯、燃料等。之后，从这些产物中依据质量平衡法认证部分产品为循环再生产物。

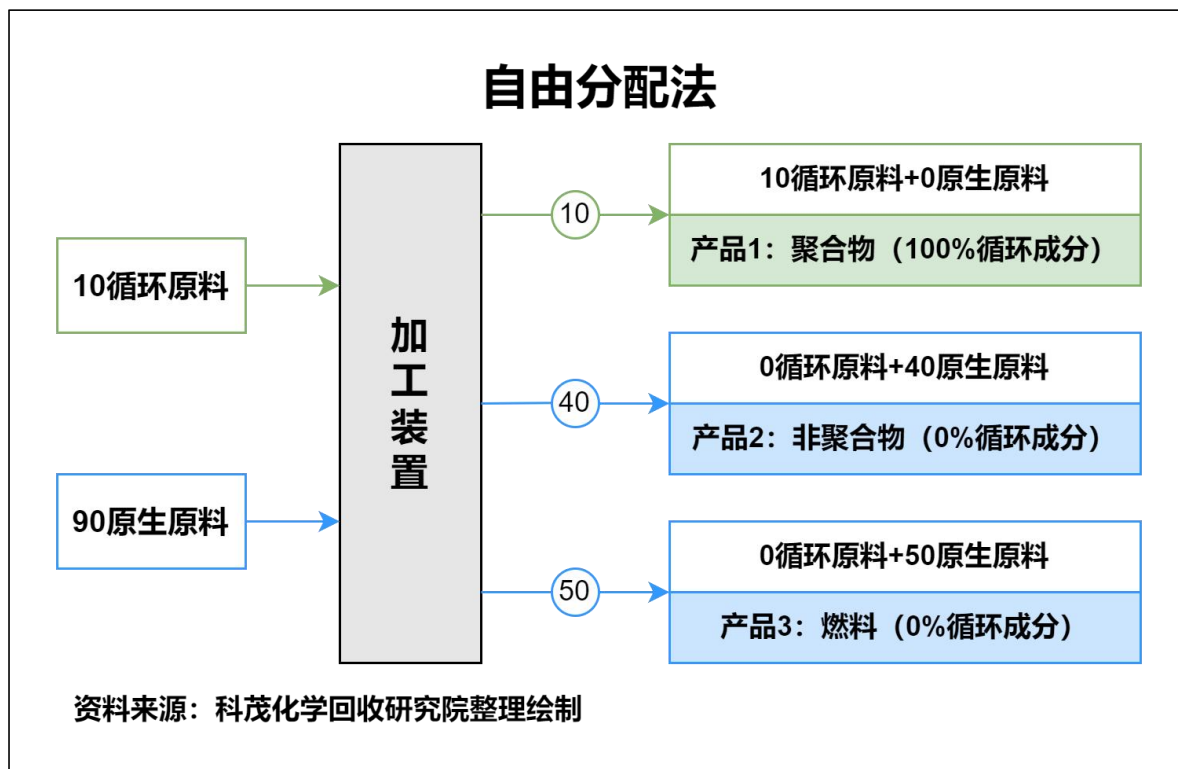
1.1.4 认证规则

质量平衡法认证有三个要求：一是可再生原料（即热解油）和原生原料（如石脑油）的化学性质具有较高的相似性，可以通过现有装置混合加工并且得到相应的目标产品；二是可再生产品和原生产品的成分及品质完全相同且无法物理分离；三是可再生成分的分配方式要符合科学的规则。

目前存在自由分配法、比例平衡分配法、燃料豁免分配法、仅聚合物分配法等不同规则。

（1）自由分配法

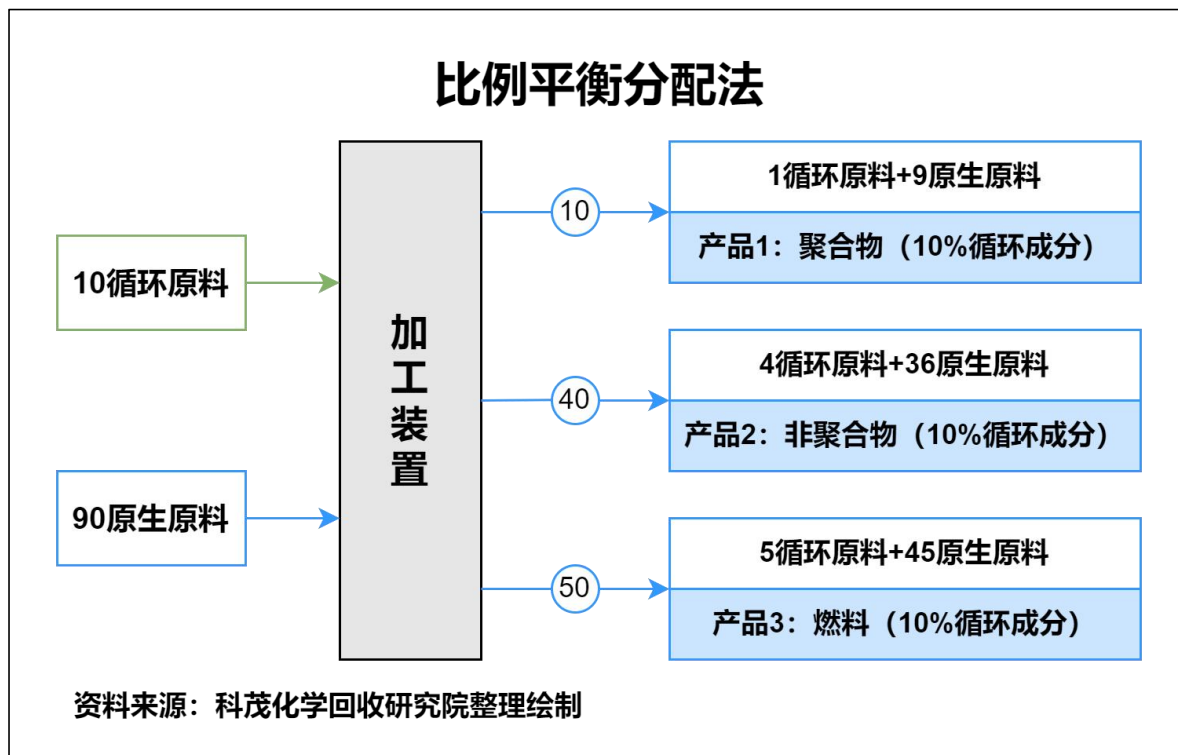
该方法提供了最大的灵活性，因为它允许企业将投入加工装置的所有循环原料分配给任何产品。



如图所示，假设在原料端投入 10 单位循环原料+90 单位原生原料，产品为 10 单位聚合物+40 单位非聚合物+50 单位燃料，则 10 单位循环原料可以全部分配给 10 单位聚合物，得到 100%循环量的聚合物。应用该方法可以得到数量最多的循环聚合物。

（2）比例平衡分配法

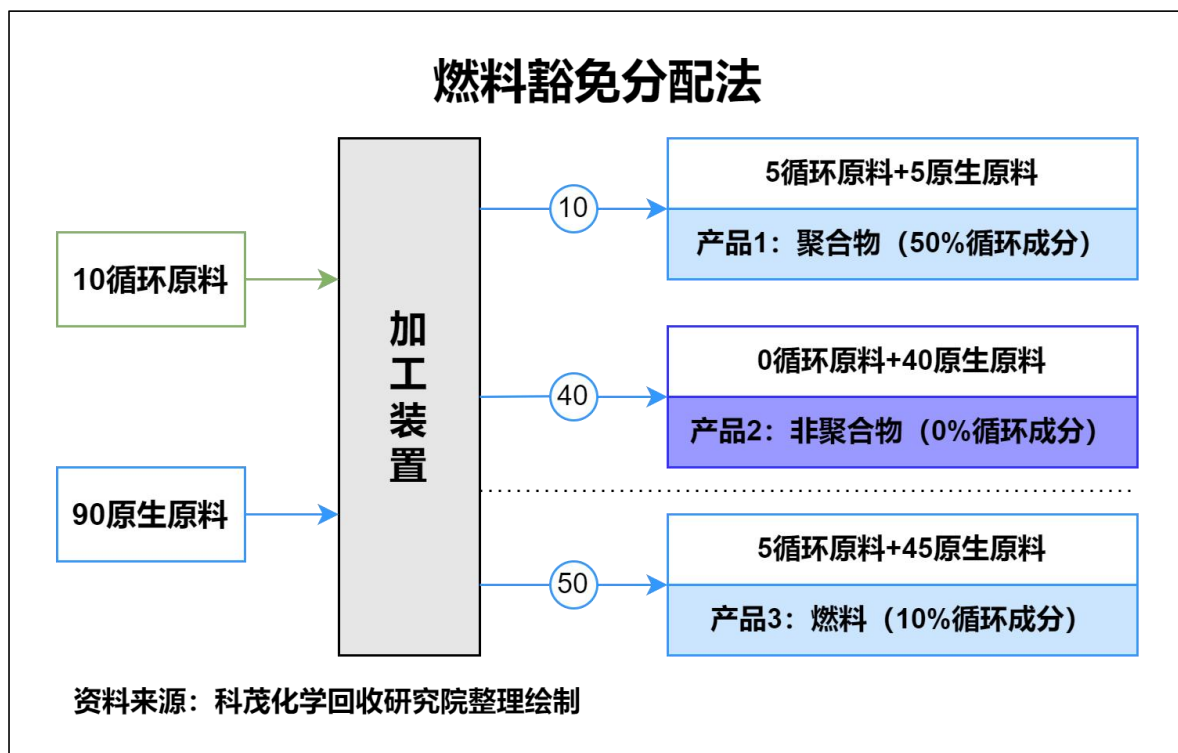
该方法将投入加工装置的循环原料按照实际比例分配给所有产品。



如图所示，假设在原料端投入 10 单位循环原料+90 单位原生原料（循环原料占总原料量 10%），产品为 10 单位聚合物（1 单位循环原料+9 单位原生原料）+40 单位非聚合物（4 单位循环原料+36 单位原生原料）+50 单位燃料（5 单位循环原料+45 单位原生原料），所有产物均为 10%循环量。应用该方法会得到数量最少的循环聚合物。

（3）燃料豁免分配法

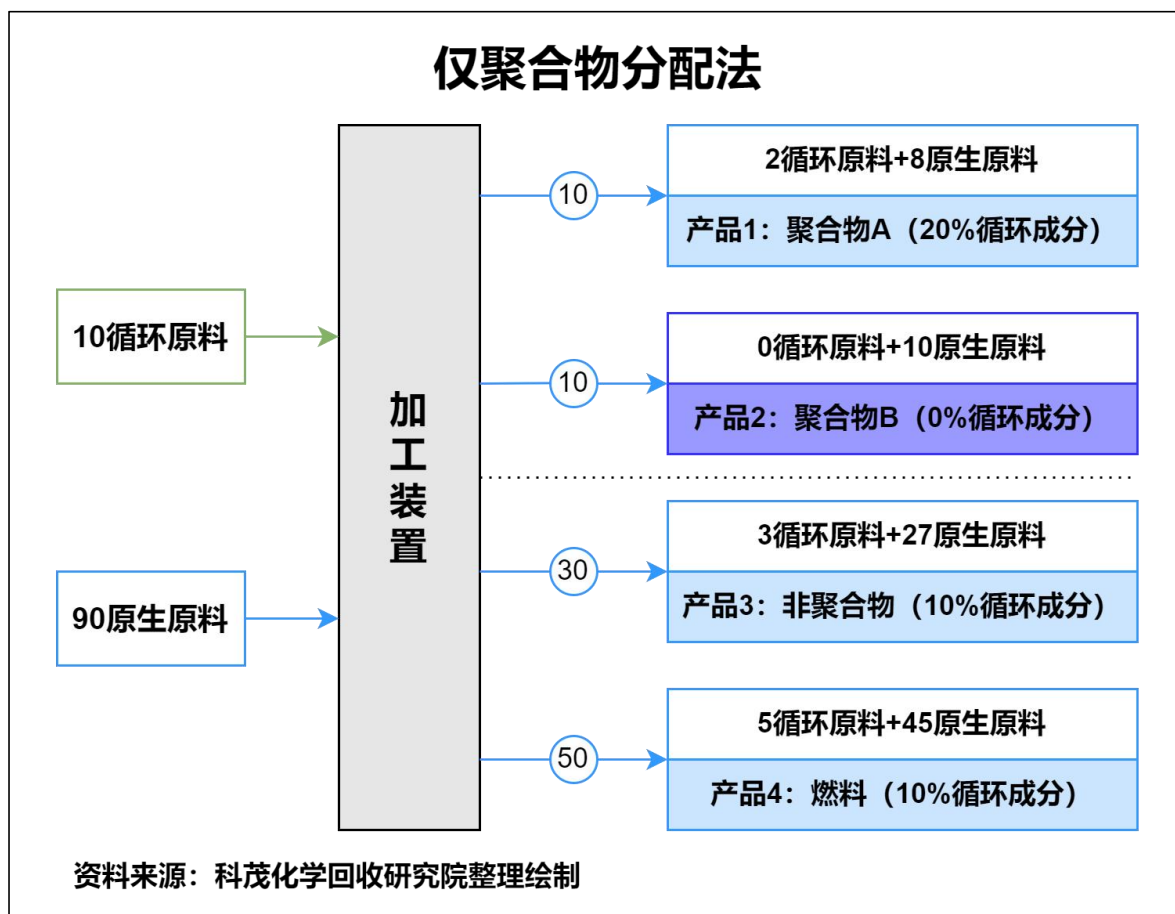
该方法需要先将循环原料中用于生产燃料的部分从计算中剔除，然后将剩余的循环原料自由分配给剩余产品。



如图所示，假设在原料端投入 10 单位循环原料+90 单位原生原料（循环原料占总原料量 10%），因 50%的产品为燃料，所以要将 50%（即 5 单位）的循环原料先行剔除，剩余 5 单位循环原料可以全部分配给聚合物，最终得到 10 单位聚合物（5 单位循环原料+5 单位原生原料）+40 单位非聚合物（40 单位原生原料）+50 单位燃料（5 单位循环原料+45 单位原生原料），其中聚合物为 50%循环量。

（4）仅聚合物分配法

该方法与燃料豁免分配法相似，需要先将循环原料中用于生产非聚合物（如燃料、药品等）的部分从计算中剔除，然后将剩余的循环原料在多种聚合物产品中自由分配。



如图所示，假设在原料端投入 10 单位循环原料+90 单位原生原料（循环原料占总原料量 10%），因 80%的产品为非聚合物，所以要将 80%（即 8 单位）的循环原料先行剔除，剩余 2 单位循环原料可以分配给聚合物 A，最终得到 10 单位聚合物 A（2 单位循环原料+8 单位原生原料）+10 单位聚合物 B（10 单位原生原料）+30 单位非聚合物（3 单位循环原料+27 单位原生原料）+50 单位燃料（5 单位循环原料+45 单位原生原料），其中聚合物 A 为 20% 循环量，聚合物 B 为 0% 循环量。

1.2 应用案例

BASF 案例：2018 年启动 ChemCycling™ 项目，在德国路德维

希港及全球多地生产基地开展相关工作。通过与 Quantafuel 等合作伙伴获取塑料热解油，与石脑油在蒸汽裂解炉中混合加工，产出超吸收剂等产品。经第三方机构 REDcert 依据质量平衡标准审核，产品中化学循环成分比例达 10%-30%，以循环产品销售。

Sabir 案例：2019 年推出 TruCircle 认证循环树脂系列，与 Plastic Energy 在全球合作，在荷兰等地生产基地将热解油加工成循环聚丙烯等产品，热解油在原料中占比超过 20%，经 ISCC 认证，产品质量与原生聚合物相当，碳足迹减少 20%-30%。

1.3 模式优势与局限性

1.3.1 优势分析

（1）充分利用现有石化装置，不需增加投资：当前化学循环终端产品的需求增长主要是从传统塑料向循环塑料的转变，塑料产业的总体需求不会在短时间内出现大幅增长，而炼油厂的规模动辄数百万到上千万吨。在这种情况下，若为生产循环塑料而新建石化装置或大规模重构现有装置，会造成产能和资源的浪费。质量平衡模式为化工企业提供了一种灵活机制，企业能够按照自身需求，在现有生产过程中融入特定数量热解油。通过精确的簿记系统，实现对不同原料和产品的区分，避免了大规模投资新装置或改造现有生产流程，以较低成本推动了石化领域向可持续方向的转型。

（2）助力达成塑料包装回收利用率目标：目前，塑料污染问题日益严重，提高塑料包装回收利用率成为全球关注的焦点。欧

洲环境署发布的报告显示，部分欧盟国家在实现塑料包装回收目标上面临挑战，18个欧盟国家可能无法实现2025年的塑料包装回收目标，而欧盟2025年的目标是将塑料回收率提升至50%，目前回收率仅为40%左右。质量平衡模式通过其独特的计算和分配方式，使化学循环工厂能够将塑料废弃物加工成热解油，进入石化企业进行加工后，产出新塑料。这有助于推动塑料包装回收目标的实现，减少塑料废弃物对环境的污染。

(3) 在行业发展早期提供数量可观的循环产品：随着全球各领域低碳循环转型，众多品牌企业、包装企业和零售企业制定了比较激进的可可持续发展目标，如根据艾伦·麦克阿瑟基金会和联合国环境规划署联合发起的“新塑料经济全球承诺”年度进展报告（2024），全球主流品牌企业和零售企业计划于2025年实现在所有塑料包装中平均使用约26%的消费后回收（PCR）成分。然而，从2018年至2023年，该数据从约5%提升至约16%，照此速度，2025年实现目标几乎是不可能的。质量平衡模式在化学循环行业发展早期，能够帮助这些企业获得数量可观的循环塑料，助力它们更好地实现PCR塑料使用目标，满足市场对可持续包装材料的需求，推动企业的可持续发展进程。

1.3.2 局限性探讨

(1) 技术经济性受限：根据质量平衡规则和下游炼油厂的要求，化学循环中间产品与炼油厂加工装置的原料之间的差异不能过大。为了适应炼油厂的加工装置，化学循环工厂往往需要调整

产品结构，产出较多短分子链中间产品，这需要更为激烈的化学反应条件，这一过程会导致产品收率折损，降低了技术经济性。

（2）技术环保性受限：热解油与炼油厂原料在杂质方面差异巨大，尤其在非金属元素方面，原油及其中间产品的杂质主要体现为硫、氮、氧等元素，而热解油的杂质主要体现为氯、硅等元素，因此炼油厂加工装置无法大量适用热解油。在原料预处理及产品后处理技术尚未广泛应用之前，化学循环工厂为了满足炼油厂要求，往往会选用洁净度较高、品类较为单一的废塑料原料，不得不弃用实际造成塑料污染的洁净度较低、混杂度较高的废塑料原料。这降低了化学循环技术对废塑料的处理能力，限制了其环保功效的充分发挥。

（3）难以解决的模式漏洞：一是质量平衡过程不透明。虽然整个供应链可能都获得了相应认证，但认证标准和过程过于复杂且不向公众公开，实际加工过程也不完全在监控之下，使得质量平衡对外界来说如同“黑匣子”，难以获得市场和客户的完全信任。二是质量平衡具有误导性。质量平衡的规则可能导致标注为100%再生材料制成的产品，实际上只有部分真正来自再生原料，大部分仍然来自化石原料，且再生原料中的大部分被加工成了燃料，而非实现循环利用。三是质量平衡的科学性存在缺陷。每个炼油厂的装置是为加工现有原料和产品方案设计的，不太适宜加工化学循环中间产品，其真实收率可能低于加工现有原料，但因现阶段化学循环产能太低，缺乏足够原料测试真实产品收率，现

行规则无法解决这一科学性问题。

1.3.3 发展前景

质量平衡模式具有灵活便捷的优势，能够不错地解决上下游紧迫的问题，因此能够在行业发展早期得到应用。但其模式天然带有一定的局限性，将来随着化学循环产能的增长、法律法规和认证体系的不断完善、下游客户要求的不断提升，该模式及其伴生的认证规则有可能会面对较大的市场挑战。而实现“全量循环”的“N+1”模式，凭借其潜在优势，可能会成为行业未来发展的重要方向。

二、“N+1”模式分析（“全量循环”模式）

2.1 定义阐述

“N+1”模式是一种创新的废塑料化学循环产业发展模式，其内容是，将在多地中小型工厂（即该模式中的“N”）进行分布式加工产出的化学循环中间产品（主要为热解油）运送至建设在区域中心位置的一体化工厂（即该模式中的“1”）进行集中加工，通过先进的“轻烃最大化”技术，得到原生品质新树脂及其他低碳循环产品。该模式下的化学循环中间产品无需与石油基中间产品进行掺混加工，所得产物 100%来源于废塑料，可实现真正的废塑料化学循环。

该模式本质上是石化技术创新带来的商业模式创新。无论将来法律规定和行业规则如何变动，该模式始终经得起技术和市场

的检验，可能会成为废塑料化学循环行业的主流模式。

2.2 “N”环节：分布式废塑料收集及加工工厂

“N”环节在“N+1”模式中承担着收集原料和初步加工的关键角色。这些工厂适宜建设在各市/区/县的循环经济园区或静脉产业园区，这种选址具有显著优势。一方面，“N”工厂可以通过与区域分选中心结合或构建分布式收集网络，广泛收集所在市/区/县未被回收的或现行回收模式下处置难度大、经济效益差的废塑料，甚至可以把“N”工厂直接建设在当地的垃圾分选中心和塑料回收企业所在园区，这会使得原料获取便利性大幅提升、成本大幅降低。另一方面，能够充分利用这些园区的资源整合和协同发展特性，与其他环保相关产业形成良好的产业互动，更好地实现城市固废的联合处置，提升资源循环利用率和塑料回收率，助力“无废城市”建设。

在原料收集阶段，这些废塑料来源复杂，涵盖了日常生活中的塑料包装、塑料制品，以及工业生产过程中产生的边角料、废料等，其成分和性质差异较大，如常见的聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯等塑料往往混杂在一起。

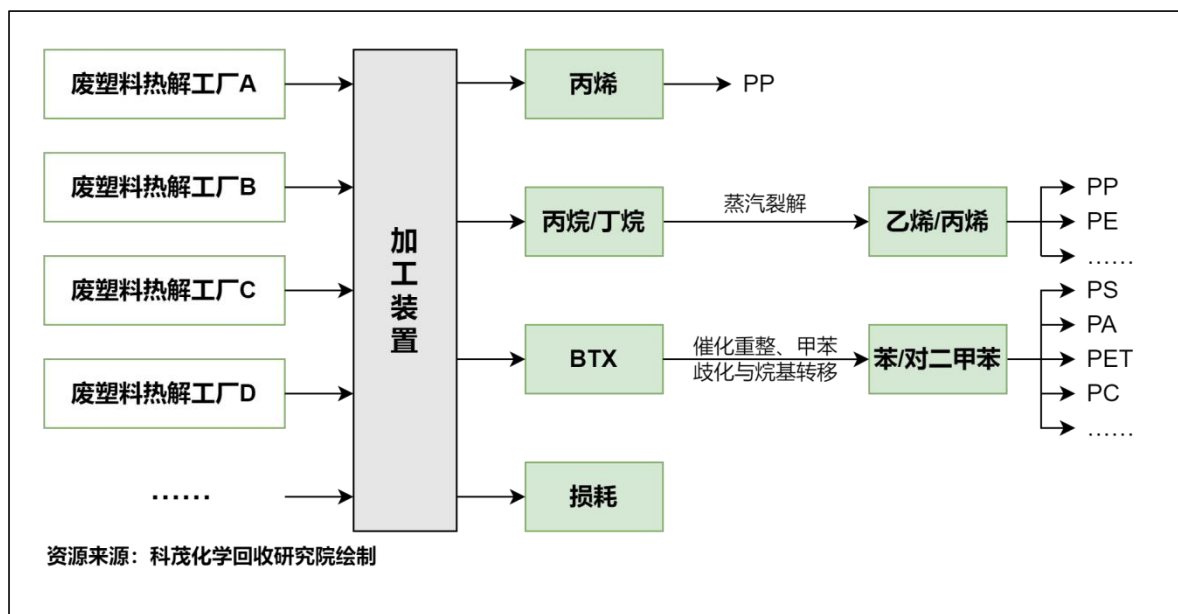
收集原料后，“N”工厂通过先进的化学循环技术，在低温、无氧及催化剂环境下，使废塑料大分子链断裂，通过精确控制温度、压力和时间等参数，将这些低值废塑料高效转化为塑料热解油。这种就地取材、就地转化的方式，极大地提高了废塑料的回收利用效率，减少了长途运输带来的成本和环境压力。

2.3 “1”环节：一体化“纯化无油”工厂

“1”工厂在“N+1”模式中处于核心加工和产品输出的关键位置，通常布局在省会或者省内处于交通要道或临江、临海的大型石化园区，便于通过水路、公路或铁路等多种运输方式，将全省各地“N”工厂生产的热解油集中运输到“1”工厂，并将产品运输给终端客户。

“1”工厂采用先进的“轻烃最大化”技术。该技术是催化裂化技术在热解油加工领域的创造性改进和应用。热解油主要由各种碳氢化合物组成，其成分复杂，包含不同链长的烷烃、烯烃和芳烃。该技术通过独特的催化体系和反应条件控制，实现对热解油中碳氢化合物的定向转化。在催化剂的选择上，采用了具有适当活性和高选择性的专用催化剂，这些催化剂能够精准地作用于热解油中的特定分子结构，促进其发生裂解、氢转移、异构化等反应。在反应条件控制方面，精确调控反应温度、压力和停留时间等参数。例如，在适宜的温度条件下，使热解油中的大分子烃类发生裂解反应，生成小分子的烯烃和芳烃；通过控制压力，优化反应平衡，提高目标产物的选择性；合理调整停留时间，确保反应充分进行，同时避免过度反应导致副产物的增加。

通过这些技术手段，该环节能够将热解油高效转化为高价值产品，其中丙烯、BTX（混合芳烃）、液化气（丙烷丁烷）三者收率合计可达85%以上，且丙烯收率可达40%以上，成为全球制丙烯收率最高的技术之一。同时不产出燃料油，实现“纯化无油”。



丙烯可直接聚合，生产聚丙烯产品。由于欧洲地区对循环树脂的需求持续增长，且相关政策对使用循环树脂有强制要求，如英国 2022 年起开始对再生塑料含量低于 30% 的塑料包装征收塑料包装税，2025 年最新税率为每吨 223.69 英镑。这使得“1”工厂生产的聚丙烯产品在欧洲市场具有广阔的应用前景和高额的溢价空间。企业可以通过将这些产品出口至欧洲，获取可观的经济效益，同时也推动了“N+1”模式在国际市场的应用和认可。即便产品不出口至欧洲，仅面向国内市场，凭借该模式在原料利用、生产流程等方面带来的成本优势，相较于传统聚丙烯企业，也能在国内市场获取更大的利润空间。

对于 BTX 和液化气，在“1”工厂所在的省级中心石化园区内可以找到对应的下游企业，形成紧密的产业链闭环。BTX 作为重要的化工原料，其下游企业可以利用它生产纯苯和对二甲苯。纯苯又可进一步用于生产苯乙烯、己内酰胺等多种树脂产品；对二

甲苯则主要用于生产 PET 等树脂产品。

液化气则可以输送到园区内的蒸汽裂解装置，与石脑油一同进行裂解反应。值得一提的是，在该反应过程中，液化气裂解所产生的乙烯、丙烯收率并不低于石脑油。这不仅提高了资源的综合利用效率，还增强了园区内化工产业的协同发展能力和市场竞争力。通过这样的方式，“1”工厂将热解油转化为多种高价值产品，乃至全部导向塑料，在满足市场需求的同时，也为“N+1”模式的持续发展提供了有力支撑。

2.4 模式优势

根据全球头部石化企业及业内主流企业的 LCA 报告，化学循环处置一吨废塑料，相较于焚烧，可以减少 2 吨左右的碳排放。在“N+1”模式下，通过“N”工厂对废塑料的收集、预处理以及“1”工厂的高效加工转化，不仅在经济效益上成果显著，还能在环境保护领域大放异彩。一方面，凭借对塑料污染的有效治理，减少塑料废弃物对环境的危害，助力打造“零碳园区”与“无塑园区”；另一方面，其卓越的经济性有望吸引更多资源投入，带动上游垃圾分选朝着大规模、自动化方向发展，促使除塑料外的其他各类垃圾也能实现分门别类的资源化利用，为构建“零碳城市”、“无塑城市”乃至“无废城市”提供强大助力，真正实现经济发展与环境保护的双赢局面，让鱼和熊掌兼得。

三、两种模式对比分析

3.1 经济成本对比

3.1.1 原料采购成本

质量平衡模式下，化学循环工厂为了满足炼油厂对热解油杂质含量的要求，往往倾向于选择洁净度较高、品类较为单一的废塑料原料。这使得其原料采购范围相对较窄，可能需要支付更高的价格来获取符合要求的原料。例如，对于一些需要经过复杂分选和预处理才能满足要求的废塑料，采购成本会显著增加。

“N+1”模式中的“N”环节对废塑料原料的混杂程度适应性更高，可以直接处理来源广泛、混杂度高的废塑料。这使得其原料采购范围更广，能够充分利用各种低值废塑料，降低原料采购成本。如城市垃圾中分拣出的混合废塑料，“N+1”模式的工厂可以经过简单的预处理甚至不经预处理直接进行加工，无需进行严格的分选和预处理。

3.1.2 运输成本

运输成本可分为塑料原料运输和油品运输两个环节。

质量平衡模式下，废塑料化学循环工厂为满足炼油厂对热解油组分的要求，往往需要产出分子链更短、密度更小、闪点更低的产品（如类似石脑油、汽油组分）。这使得其危险性较高，极易被判定为化工项目，必须建设在化工园区，项目布局地点大受限制。同时化工园区通常远离居民区，原料运输距离一般较长。

“N+1”模式中，“N”环节仅需将废塑料液化，产物在常温下能够保持液相即可，因此产物分子链可以更长、密度更大、闪

点更高（如类似柴油、重柴油甚至蜡油组分）。这使其危险性大大降低，可能不须建设在化工园区，可以建设在循环经济园区或静脉产业园区，项目布局地点选择多样化，可选择距离居民区较近的园区建设项目，原料运输距离较短。

在油品运输环节，两种模式下的化学循环工厂和炼油厂的相对位置不固定，平均来看油品运输成本大致相当。

需要特别说明的是，质量平衡模式下，存在化学循环工厂和炼油厂建设在同一个化工园区的可能性。因此有必要对比“质量平衡模式下把各地收集到的塑料原料直接运送至化工园区”和“‘N+1’模式下先把废塑料加工成热解油再运送至化工园区”的运输费用。

科茂化学回收研究院按照“废塑料体量 10 万吨/年、原料收集点到化工园区平均距离 500km、原料收集点到化学循环工厂平均距离 30km、化学循环工厂到化工园区平均距离 500km、垃圾压缩和运输费用采用行业一般数据”计算，前者的运输费用大致为 180-200 元/吨废塑料，后者的运输费用大致为 140-160 元/吨废塑料，较前者低约 20%。

3.1.3 加工与设备成本

质量平衡模式下，为了适应热解油的加工，可能需要对现有装置进行一定改造或增加净化设备，以满足热解油与原生原料混合加工的要求。无论这些改动或增加净化设备发生在化学循环工厂还是炼油厂，都是一笔不小的投资。例如，为了降低热解油中

的杂质含量，可能需要安装专门的加氢、吸附等净化设备，一套中等规模的净化设备投资可能高达数千万元，后续使用催化剂也是不少的费用。同时，在运行过程中，由于热解油与原生原料的性质差异，可能需要更频繁地调整工艺参数，增加了操作难度和运行成本。维护方面，由于引入了新的原料和工艺，设备的维护难度和频率可能增加，维护成本也相应提高。

“N+1”模式中，“N”环节的废塑料制油设备相对简单，且不需要对热解油进行复杂的后处理，投资和运行成本相对较低。

“1”环节采用先进的“轻烃最大化”技术，生产流程更短、产品收率更高，单位产品的设备投资较传统炼油厂低 30%-50%，甚至更多。运行方面和维护方面，由于设备的专业性和针对性，运行和维护工作相对更具规律性和可操作性，成本相对可控。

3.1.4 综合成本效益评估

综合上述各项成本因素，科茂化学回收研究院认为，质量平衡模式在原料采购、运输、加工与设备成本方面均面临较大压力。虽然该模式在行业发展早期能带来一定收益，获取相应市场份额，但从长期来看，随着市场竞争加剧以及成本的不断上升，其利润空间可能逐渐被压缩。

而“N+1”模式通过广泛的原料采购范围，合理的工厂布局，“N”环节设备简单、“1”环节高效转化的特点，使得加工与设备成本更具优势。从经济效益角度看，“N+1”模式将更多废塑料转化为高附加值产品，在满足市场需求的同时，能为企业带来更

可观的利润回报。

3.2 技术性能对比

3.2.1 原料适应性

质量平衡模式对废塑料原料的要求较为苛刻。为了确保炼油厂装置的安全稳定运行和产品质量，化学循环工厂需要对废塑料原料进行严格筛选和预处理。例如，对于聚氯乙烯废塑料，若直接加工成热解油进入炼油厂，会对设备造成腐蚀。因此，往往需要对这类废塑料进行特殊处理或直接排除在原料范围之外，这限制了其对废塑料原料的适应性。

“N+1”模式则展现了卓越的原料适应性。因为“1”环节对热解油杂质含量有更高的接受度，所以“N”环节对废塑料原料也有更高的接受度，能够处理各种来源、不同种类混杂的废塑料原料。无论是日常生活中的混合塑料废弃物，还是工业生产中产生的复杂废塑料，都可以作为原料。

3.2.2 产品收率与质量

在产品收率方面，质量平衡模式存在一定局限性。一方面，为满足炼油厂装置的进料要求，热解油组分的分子链长度需控制在一定范围内，如类似石脑油和汽油，那么在化学循环过程中，需要更加激烈的反应条件，这会产出更多热解气和碳渣，导致热解油收率相应降低；另一方面，受到炼油装置设计和工艺限制，热解油中的有效成分可能不会得到充分转化，大量热解油被转化为汽柴油及其他燃料，真正转变为高价值材料（如聚合物等）的

比例较低。这导致了资源的浪费，降低了废塑料化学循环的经济效益和环保效益。

“N+1”模式在产品收率上具有显著优势。一方面，因“1”环节对原料要求较为宽泛，分子链长度达到柴油甚至蜡油都可以接受，这使得“N”环节裂解反应可以比较温和，热解油收率相对更高；另一方面，“1”环节采用先进的“轻烃最大化”技术，丙烯、BTX、液化气收率合计可达85%以上，其中丙烯收率可达40%以上。这使得更多的废塑料能够转化为具有高附加值的新材料，提高了资源利用效率和经济效益。

在产品质量方面，质量平衡模式下，由于热解油与原生原料混合加工，产品质量受到混合比例、热解油质量以及炼油厂装置稳定性等多种因素影响。若热解油质量不稳定或混合比例不当，可能会导致产品质量波动，影响产品的市场竞争力。

“N+1”模式的产品质量更具稳定性和可控性。“1”工厂采用专门的技术和设备，对热解油进行深度加工，能够精确控制反应条件，确保产品质量的稳定性。同时，“N+1”模式生产的产品全部来自废塑料，具有明确的循环属性，符合“GRS”认证标准，更符合市场对可持续产品的要求，在市场上具有更高的附加值和竞争力。

3.2.3 技术可持续性

从技术发展角度来看，科茂化学回收研究院认为，质量平衡模式是在现有石化装置基础上进行的一种过渡性模式。随着化学

循环产能的提升和技术的进步，其对现有装置的依赖以及人为规则性的特点，可能会限制其进一步发展。例如，当未来对循环产品的质量和循环比例要求更加严格时，质量平衡模式可能难以满足要求，需要对现有装置进行更大规模的改造或寻求新的技术路径。

“N+1”模式则具有更强的技术可持续性。其核心技术“轻烃最大化”技术是专门为加工塑料热解油开发的。随着技术的不断发展和完善，该模式能够不断提高热解油转化效率和产品质量，适应未来市场和政策的变化。

在环保方面，质量平衡模式虽然在一定程度上提高了塑料包装的回收利用率，但由于其产品中仍有大量燃料产生，未能真正实现废塑料的全量循环利用，其碳排放表现并不理想，对环境的潜在影响也相应较大。

“N+1”模式实现了真正的废塑料全量循环利用，将废塑料最大限度转化为高价值材料，减少了废塑料对环境的污染。同时，由于其产品收率高，资源利用效率高，相对减少了能源消耗和碳排放，更符合可持续发展的环保理念。

3.3 市场前景对比

3.3.1 市场需求匹配度

随着全球进入低碳循环转型时代，市场对循环再生材料的需求呈现出快速增长的趋势。预计到 2030 年，仅欧洲地区对高品质循环塑料的需求可达 1000 万吨。品牌企业、包装企业和零售企业

为满足政策要求，纷纷制定可持续发展目标，加大对循环塑料的采购力度。

质量平衡模式在市场需求匹配度方面存在一定问题。虽然在行业发展早期，它能够提供一定数量的循环产品，但由于其产品中真正的循环成分比例较低，且认证规则复杂，消费者信任度较低。例如，标注为 100%再生塑料制成的产品，实际可能只有极少部分真正来自再生塑料，这可能使消费者对产品的信任度降低，最终影响了市场需求。

“N+1”模式生产的产品全部来自废塑料，具有明确的循环属性，且产物指标与原生产品完全相同，能够完全满足市场对高质量循环再生材料的需求。在市场需求匹配度上具有明显优势。

3.3.2 政策适应性与发展机遇

质量平衡模式在政策适应性方面面临一些挑战。虽然其在一定程度上符合当前部分政策对塑料包装回收利用率的要求，但随着政策对循环产品质量和循环比例的要求不断提高，其人为规则性的认证方式可能难以满足政策的严格审查。例如，未来政策可能要求循环产品必须标明真实的循环成分比例和更清晰的溯源体系，质量平衡模式可能需要进行大量调整和改进才能符合要求，甚至无法符合要求。

“N+1”模式更能适应政策的发展趋势。无论未来政策和认证规则如何变化，其全量循环的特点和明确的循环产品属性都能够满足要求，以不变应万变。这为“N+1”模式带来了广阔的发展机

遇，有助于在项目审批、资金扶持、税收优惠、原料采购、产品销售、客户认可等方面得到政府和上下游合作伙伴支持，促进其快速发展。

3.3.3 竞争态势分析

（1）当前竞争格局

目前，废塑料化学循环市场处于蓬勃发展阶段，吸引了众多跨国企业参与。质量平衡模式由于其发展较早，已经有一些企业在市场上占据了一定份额，如 BASF、Sabic 等化工巨头。这些企业凭借其在石化领域的技术和资源优势，在质量平衡模式下开展废塑料化学循环业务。

然而，随着“N+1”模式的出现和发展，市场竞争态势正在发生变化。“N+1”模式以其独特的技术优势、经济成本优势和产品价值优势，吸引了越来越多的企业关注和投入。例如，科茂公司在“N+1”模式的研发和实践方面取得了显著进展，其 60 万吨/年“废塑料到新塑料”全球灯塔工厂项目已在建设阶段，将对市场竞争格局产生重要影响。

从长期来看，“N+1”模式可能会在市场竞争中占据优势地位。其技术的可持续性、产品的高质量和市场需求的高匹配度，使其更具竞争力。随着“N+1”模式的推广和应用，市场份额可能会逐渐向采用该模式的企业倾斜，推动整个废塑料化学循环行业向更加高效、可持续的方向发展。

（2）“N+1”模式的长期优势

在此，需要进一步强调“N+1”模式在应对行业发展潜在问题时展现出的优势。随着塑料热解油产能扩充，存在新建一个规模化炼油厂只加工热解油的情况。

科茂化学回收研究院认为，即便在未来技术和产能允许的情况下，建设一个规模化炼油厂也将面临诸多难题。规模化炼油厂产能至少几百万吨，这意味着需要大量热解油作为原料。为生产如此数量的热解油，所需的废塑料来源将涉及 3000 万-5000 万甚至更多人口，在实际操作过程中，收集如此庞大数量的废塑料运输到一个地方，这会面临着极大的挑战。

退一步讲，即使成功收集到大量废塑料并加工成热解油，在常规的石化技术路线下，仍会产生相当数量燃料油，塑料循环利用率仍有较大提升空间。而“N+1”模式则有潜力解决这些问题。凭借“纯化无油”的技术特点，在后端聚烯烃装置规模一定的情况下，前端的“油头”规模可以缩小一半以上，数十万吨规模即可实现卓越的经济效益。这极大地降低了原料的可获得性和稳定性风险。

并且，“N+1”模式还具备强大的规模拓展潜力。随着行业发展，该模式将来也可以扩大规模。由于其技术具备高度灵活性，企业可以根据市场行情，灵活调整生产策略，选择多产乙烯或者多产丙烯，这显著增强了企业的抗风险能力。

（3）“N+1”模式独特的市场拓展方式

依托卓越的技术经济性，“N+1”模式可以打造出极具创新性

的市场拓展架构。在该模式下，“1”环节企业与分布于各地市/区/县的地方企业，共同构建起深度融合、紧密无间的产业链合作生态，双方相互耦合、携手共进，实现资源共享与优势互补。

“1”企业凭借自身先进的技术与资源整合能力，为地方企业提供废塑料制热解油的“N”装置使用方案。地方企业则充分利用自身的本地资源关系网络，积极开展工厂建设，高效获取原料并进行热解油加工。

通过这种创新合作模式，“1”工厂在确保地方企业获得合理利润空间的同时，能够以更具性价比的方式稳定获取热解油。从地方企业角度看，极大缓解了前期资金压力，运营负担也得以显著减轻；从“1”工厂角度而言，在原料采购上获得了突出的价格优势。相较于质量平衡模式下一般化学循环技术企业单纯售卖装备的常规做法，“N+1”模式通过独特的合作机制，有力地降低了整体运营成本，显著提升了经济效益。

科茂化学回收研究院认为，这种优势诠释了技术创新如何驱动商业模式创新，充分凸显了“N+1”模式在废塑料化学循环行业中的前瞻性与适应性。正是凭借这种精巧且高效的“小而美”创新模式，“N+1”模式可能会在激烈的市场竞争中稳固立足，保持不败之地。

四、关于废塑料化学循环产业模式的几点建议

4.1 政策建议

4.1.1 推动塑料热解油产品标准制定

当前，塑料热解油产品标准的缺失，严重制约了废塑料化学循环行业的发展。制定产品标准已成为当务之急。

在制定标准时，建议采取较为宽泛的标准设定方式。这是因为，宽泛的标准能够容纳更为广泛的低值废塑料进入化学循环体系。低值废塑料通常来源广泛、成分复杂，若标准过于严格，这些废塑料将难以被有效利用，从而无法充分发挥化学循环在解决塑料污染问题上的巨大功效。

通过制定宽泛的标准，能够降低对原料的限制，使更多低值废塑料得以通过化学循环得到处置，提高废塑料的回收利用率，从源头上减少塑料废弃物对环境的危害，推动废塑料化学循环行业朝着更高效、更环保的方向发展。

4.1.2 税收优惠政策

为鼓励化学循环行业更快更好，建议国家部委研究对化学循环工厂到一体化工厂（无论是现有炼油厂还是将来的新型工厂）的塑料油商务交易环节免征成品油消费税。

在实施过程中，可以通过五联单的形式进行点对点豁免。五联单作为一种有效的监管手段，能够确保消费税豁免的精准实施，实现对化学循环产品从生产到运输再到加工的全过程追踪。防止塑料油以燃料油方式冲击成品油市场。

通过这种方式，一方面可以降低化学循环企业发展早期的运营成本，鼓励更多企业积极参与到行业中来；另一方面，也能够

保证税收政策的公平性和透明度，避免出现税收漏洞和不公平竞争的情况，既鼓励了化学循环行业的发展，又不会对现有的燃油市场造成冲击，实现化学循环行业与传统燃料市场的协调发展。

4.1.3 鼓励制定废塑料资源化目标

在当前的发展形势下，鼓励部分经济发达地区率先制定明确的废塑料资源化目标具有重要意义。

经济发达地区通常具备更完善的基础设施、可以有效整合更先进的技术和更充足的资金，有能力在废塑料资源化方面先行先试。这些地区可以根据自身的实际情况，制定具有针对性和可操作性的目标，如规定在一定时间内将废塑料的回收利用率提高到比较高的水平，或者明确化学循环产品在塑料市场中的占比等。

通过这些目标的设定，可以引导当地企业加大对废塑料资源化的投入，推动技术创新和产业升级。在部分地区取得成功经验后，逐渐在全国范围内推广开来，能够带动全国废塑料化学循环行业的整体发展，提高全国的废塑料回收利用率，减少塑料废弃物对环境的污染，促进资源的循环利用和可持续发展。

4.2 对终端企业的建议

品牌企业、包装企业、互联网快递企业等使用塑料的终端企业在推动废塑料化学循环行业发展和环境保护方面可以发挥极其关键的作用。积极使用化学循环 PCR 塑料，对于终端企业而言，不仅是履行社会责任的体现，更是顺应市场发展趋势、提升企业品牌形象的重要举措。

随着消费者环保意识的不断增强，对环保产品的需求日益增长，终端企业使用化学循环 PCR 塑料，能够满足消费者对可持续产品的需求，增强消费者的认同感和忠诚度。全球头部的品牌企业和包装企业制定了可持续发展目标，加大对循环塑料的采购力度，积极使用化学循环 PCR 塑料，有助于这些企业更好地实现自身的可持续发展目标，提升企业在市场中的竞争力。从更宏观的角度来看，终端企业广泛使用化学循环 PCR 塑料，能够形成强大的市场拉力，促进废塑料化学循环行业的快速发展，推动整个塑料产业向绿色、低碳、循环的方向转型升级，为解决全球塑料污染问题做出积极贡献。

因此，我们有理由相信，产业链上下游企业会快速行动起来积极选用化学循环 PCR 塑料，为环保事业贡献力量。

五、结论与展望

在全球积极推动塑料污染治理与石化产业低碳循环转型的进程中，废塑料化学循环的产业发展模式备受瞩目。本文对“质量平衡”模式与“N+1”模式进行深入剖析，两种模式在行业发展中各有表现，呈现出鲜明差异。

“质量平衡”模式在行业发展初期具有一定优势，同时存在诸多局限性，而“N+1”模式则展现出全方位的优势。因此，科茂化学回收研究院认为，“N+1”模式凭借其技术和经济成本的综合优势，为解决塑料污染问题提供了一种更优的选择，未来有可能

在行业中占据重要地位，推动整个废塑料化学循环行业向更加高效、可持续的方向发展。

为了推动行业更好发展，未来需要政府、企业和社会各界共同努力。建议政府加大对“N+1”模式的支持力度，完善相关政策法规，为“N+1”模式的发展创造良好的政策环境。建议企业积极投身“N+1”模式的实践，加强与上下游企业的合作，构建稳定高效的供应链体系。建议社会各界加强对废塑料化学循环行业的宣传和推广，提高公众对塑料污染问题的认识，增强公众对循环再生材料的接受度和认可度，为行业的发展营造良好的社会氛围。

科茂化学回收研究院在此呼吁各界有识之士，让我们携手共进，共同推动废塑料化学循环行业朝着更高效、更可持续的方向发展。在解决塑料污染问题的同时，创造巨大的经济价值和社会价值，为我们的地球家园打造一个更加绿色、美好的未来！相信在各方的共同努力下，废塑料化学循环行业必将迎来更加辉煌的明天！