

食品包装回收：现状与展望



作者

Mona Arnold, VTT 芬兰国家技术研究中心

前言

食品包装在日常生活中必不可少，不仅确保食品安全卫生，延长其保存时间，而且有力地促使食品在世界范围内变得人皆可负担。食品包装有助于减少食物损失和浪费，从而在减少食物系统的碳排放影响方面也扮演关键角色。而 Huhtamaki 普乐集团认为，食品包装除了实现其本身用途之外，也需要有低碳设计，这就是为什么采用环境友好型材料设计的食品包装的原因。

Huhtamaki 普乐集团认为，食品包装的好处毋庸置疑，但要努力让消费使用后的包装不被废弃，免于负面影响。废弃物需要得到更高的回收率和更高质量的回收处理，使包装材料重新利用。我们认为，使用后的废弃包装应作为有价值的次级材料，在目前资源紧张的环境中，在原材料供应方面发挥重要作用。

芬兰国家技术研究中心（VTT）的这份综合报告，概述了欧洲和美国的回收现状，以及影响回收率的社会和技术因素。它还介绍了新近的食品包装回收技术创新，并重点解析那些未来五年内有望商业化的解决方案。

Huhtamaki 普乐集团希望推动真正的系统性变革，形成超越单一公司、整合全价值链的低碳循环系统。我们认为，创新、合作和更有效地利用生产者责任延伸制度，是建立环境友好型食品包装材料体系的积极途径。这样的体系能提供安全、可负担的食品，有助于减少食物浪费，并能循环再生，最大限度地提高食品包装材料对地球和人类的價值，从而实现低碳循环经济。

我们坚信，这份报告将为行业、社会和政府相关方面的通力合作提供参考。

Thomasine Kamerling
可持续发展与传播执行副总裁
Huhtamäki 普乐集团

概要

食品包装在我们日常生活中扮演重要角色，推动了食品的可达性和可负担性。它是确保食物的卫生、保存和分配的关键，其直接作用是最大限度减少食物浪费。历史上看，在食品领域，塑料一向是应用最多的材料，而纸和金属也是常用材料。如今，食品包装的重点工作是减少塑料包装，或完全用回收材料或可生物降解材料来代替塑料。全球中产阶级涌现，贸易和消费增长，使得食品包装的使用显著增长，因此，包装的循环利用和重复使用，不仅是欧洲循环经济战略重点，在全球其他区域也受到极大关注。

过去几年中，食品包装的生态设计和回收技术，都有相当大的进步，但包装的回收率，特别是塑料和聚合物淋膜包装的回收率，仍然相对较低。例如，在美国，食品和餐饮塑料包装回收率约为 14%，在欧洲，有报告可循的塑料包装回收率约为 40%，比较而言，纸板的回收率在美国和欧洲都约为 80%。一个运行良好的回收再生系统，不仅取决于当地的再生利用能力，还取决于收集和分类等基础设施条件，而这些条件在世界上许多国家还很不成熟。

我们预见，在未来五年，将有新的包装回收体系问世，可处理目前尚未大规模回收的包装。在现有回收体系中，大量的包装，特别是复合材料包装，并不易回收。这为当今主流的物理回收带来了挑战。

虽然纸纤维材料的循环利用已经广泛建立，但在许多回收体系中，不包含淋膜纸包装，这些包装往往最终作为混合垃圾处理，而非得到循环利用。现在，一些纸杯生产商，以及为餐饮行业提供废弃物管理的公司，建立了具备一定经济规模的集中回收体系，也推出了分离聚合物和铝质淋膜层的新解决方案。

影响回收率的主要因素是缺乏先进的分类设备，以及缺乏可作为物理回收补充手段的化学回收技术的部署。特别是针对多层塑料包装，有商业规模的物理回收手段非常少，化学回收被视为解决多层塑料包装的一种有效方案。因此，我们认为，未来 3-4 年，美国、欧洲和东亚的化学回收产能将显著提高。化学回收的重要特点是，经由化学回收的聚合物在充分解聚后可再次用于食品包装。而如今，市场上，仅有再生的 PET 材料被认证为食品接触材料(FCM)的回收聚合物。

研发回收解决方案的根基在于，由品牌商、回收分类技术开发商和废弃物管理公司成立商业联盟。这种合作关系对新回收技术的未来投资至关重要；它连接了循环利用原材料的提供方和再生材料的使用方。

缩写列表

EFSA	European Food Safety Administration 欧洲食品安全局，评估食品接触材料(FCM)物质的安全性。欧洲食品安全局还对食品接触材料中使用的再生塑料的回收过程进行安全评估。
EPA	Environmental Protection Agency 美国环境保护署
FDA	US Food and Drug Administration 美国食品和药物管理局，在逐案的基础上评估回收塑料的拟议使用，并就回收过程是否符合生产用于食品接触应用所需纯度的再生材料（塑料）发布非正式建议。
FCM	Food Contact Materials (Europe) 食品接触材料(欧洲)
FCS	Packaging & Food Contact Substances (US) 包装与食品接触物质(美国)
ISCC	International Sustainability and Carbon Certification 国际可持续性和碳认证，是一个独立的多方利益相关者组织，为原材料和产品的可持续性提供了一个全球适用的认证体系。通过 ISCC Plus 标准认证的再生或生物质产品，使用质量平衡方法来跟踪再生内容物或生物质内容物的可持续性特征，这对可再生材料或使用化学回收方法回收的材料更有利。
PE	polyethylene 聚乙烯
PP	polypropylene 聚丙烯
PS	polystyrene 聚苯乙烯
rPET	recycled PET (polyethylene terephthalate) 再生 PET(聚对苯二甲酸乙二醇酯)
rPX	recycled polymer 再生聚合物

目录

食品包装回收：现状与展望.....	1
前言.....	2
概要.....	3
引言.....	6
包装回收现状.....	6
食品包装回收价值链的影响因素.....	9
使用再生材料的食品包装材料市场状况.....	10
使用后包装的分类和回收.....	11
纸和纸板包装的回收、趋势和前景.....	12
关于水循环闭环.....	13
纸基复合包装的回收.....	13
铝塑的回收.....	14
纸杯回收.....	15
塑料包装回收.....	15
物理回收.....	15
化学（高级）回收.....	16
PET 的回收.....	18
讨论.....	18

引言

过去十年中，包装行业经历了重大变革。目前包装设计正朝轻量化、高阻隔性的方向发展，并在设计阶段就对其废弃处理予以考虑。在食品包装常用材料中，塑料继续占据市场主导地位，纸纤维和金属材质也应用广泛，玻璃作为包装材料越来越少见。食品包装材料通常使用淋膜和涂层技术，它们通过系统整合固有特性不同的材料，来提高包装最终的功能性，延长保质期并减少包装重量，而包装减重也对低碳有一定贡献。

包装的主要功能是保护食物。如果没有包装，对人类至关重要的食品分配，在物流、经济和环境方面都将面临挑战，也会造成食品浪费。与此同时，食物贸易和消费的增加，导致包装使用增加，各国政府正寻求运用类似欧盟循环经济战略的政策举措，解决消费使用后包装的潜在负面影响。

本文首先介绍了欧洲和美国的回收现状，而后介绍影响回收率的社会和技术因素，食品包装回收的最新技术创新，并重点介绍预计未来五年内可商用的解决方案。

包装回收现状

欧盟委员会将包装的回收利用列为首要任务之一。事实上，最新修订的《包装和包装废弃物指令》(PPWD)，包含了促进包装废弃物的重复使用、回收利用和其他形式的回收新措施，而不止于废弃处置。该指令设定的目标是，到2025年，50%的塑料包装和75%的纸和纸板得到回收利用。此外，一次性塑料指令(2019/904/EC)的第一个要求已于2021年年中生效。2021年5月底，欧洲委员会通过了关于一次性塑料产品的导则，对某些一次性塑料产品的禁令和标签要求于2021年7月生效。

根据欧盟统计局(Eurostat)的数据，2019年，欧盟41%的塑料包装垃圾被回收，欧盟每人每年平均产生35公斤塑料包装垃圾(Eurostat 2021)。在美国，平均每个美国人每年产生约130公斤塑料垃圾，居全球之首。美国环境保护署报告称，塑料容器和包装的回收率为14%，纸和硬纸板包装的回收率为81%。瓦楞纸板是目前纸包装回收利用的最大组成部分，而其他未涂层的纸基包装，如纸箱和纸袋，大多作为混合纸类回收。此外，这些回收数据，不包括一次性盘/杯和垃圾袋，这两种物品都被归为非耐用品(图1)。

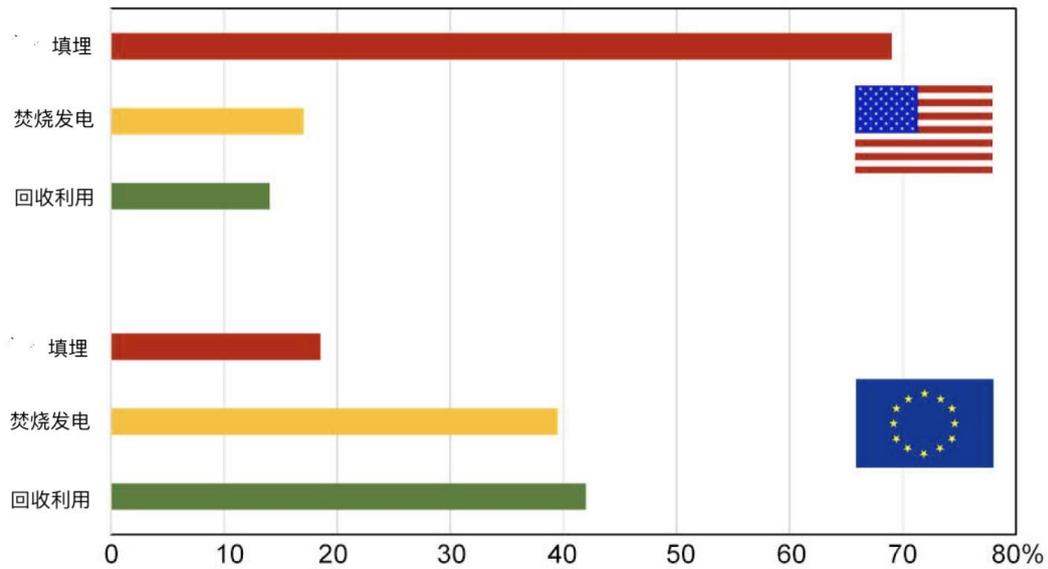


图 1:2018 年美国 and 欧盟消费后包装的处理方式

纸基复合包装整体回收率略低于纸板。根据 ACE（欧洲纸基包装与环境联盟）数据，在 2019 年投放欧盟市场的所有纸基复合包装中，51%通过单独渠道回收并再生（Eunomia 2020，ACE 2021）。而从实际进入再生利用阶段的数量看，回收率可能更低，单独收集的材料中包含分类错误或过脏的包装，不适合再生利用。Eunomia 2020 年的报告中，实际回收率估计为收集量的 40-60%。单独回收并不意味着收集的材料全用于再生处理。例如，在德国，只有 47%的塑料包装用于再生处理，而 57%被焚烧（Conversio 2020）。

以下流程图（图 2 和图 3）显示了消费使用后的纸基复合包装和塑料包装的处理过程。

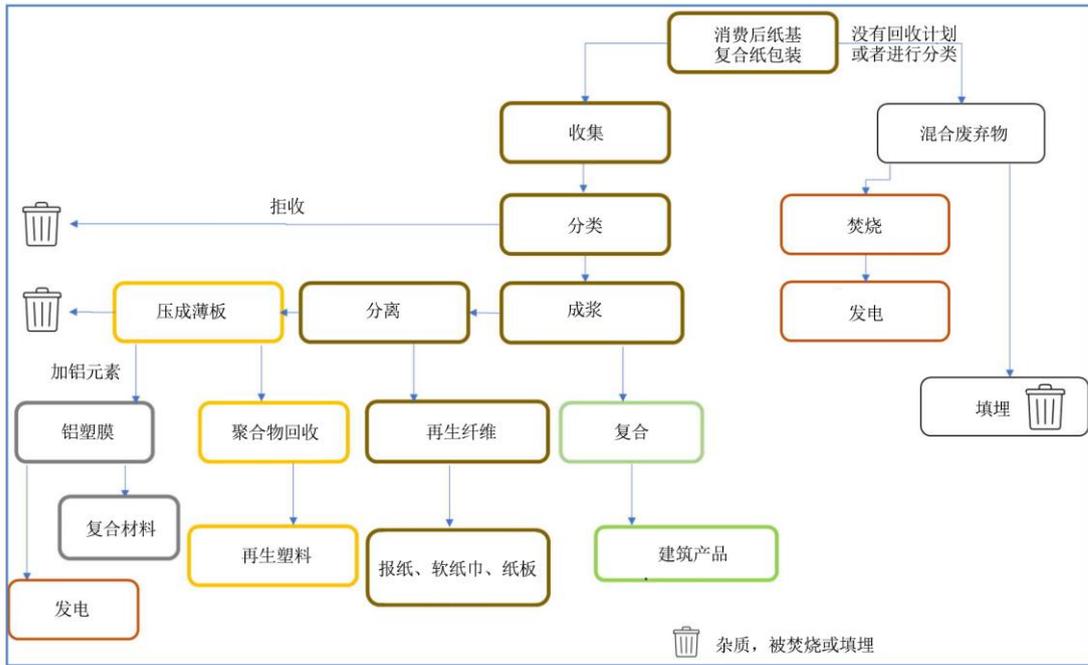


图 2 消费使用后的纸基复合包装处理流程

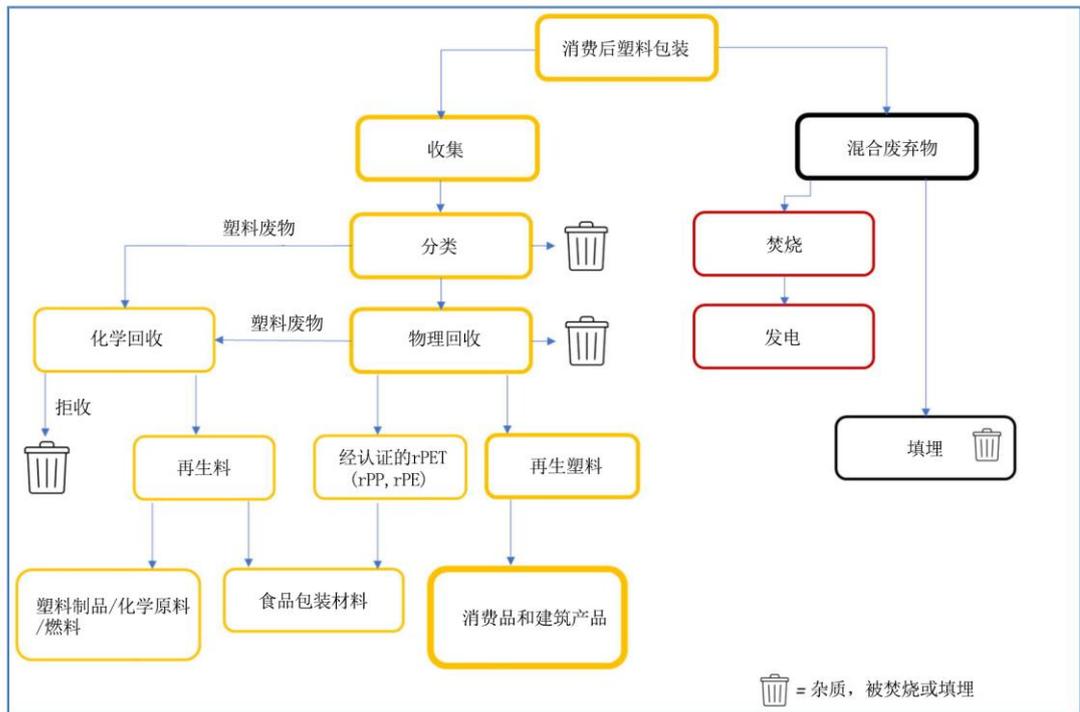


图 3 消费使用后的塑料包装处理流程，粗线代表主要产品/流程

食品包装回收价值链的影响因素

监管机构和商业机构越来越重视包装回收，并承诺克服回收规模增大的挑战。欧盟已设定目标，到 2025 年 12 月 31 日，所有包装废弃物回收率达到 65% (European Commission 2018)。主流跨国公司已签署了关于可回收包装的承诺，并建立了收集和回收的行业合作平台，一方面确保可获得废弃包装材料，另一方面也保证了再生材料的下游市场。

目前扩大回收的主要困难之一，不仅在于循环再生产能力，还包括收集和分类基础设施。这些基础设施在很多国家仍然不足。此外，即使有足够的收集基础设施，并收集了近 80% 的包装废弃物，但其余部分最终也以混合废弃物形式进入垃圾填埋场或焚烧场「根据 (Brouwer et al.2011, HSY 2019) 计算得知」。

因此，提高回收率不仅需要废弃物管理系统的技术开发。事实上，政府制定了很多策略，鼓励民众在回收利用上发挥作用。根本上，市政当局负责向居民提供相关信息，让居民能在家中针对不同垃圾分类，即在源头分类。由此，这样的系统必须让居民免于混乱和不便。例如，瑞典和法国的研究表明，分类不便会影响居民正确分类 (CITEO 2021, Roustia and Ekström 2013)，而回收点与居住区之间的距离等因素，会让消费后的纸包装与塑料包装更易被错误分类。大部分包装都用于食品产品，而食品包装是家庭垃圾中最易被错误分类的 (Nemat et al. 2020)。

在废弃物管理基础设施良好的地区，对包装废弃物单独收集和分类，已成为大多数家庭的日常。即使这些地区，大部分消费使用后的包装，仍以混合废弃物形式处理(HSY 2019)。收集后的废弃物包装中，很大一部分被错误分类。图 4 描述了荷兰的包装废弃物回收流程。在收集到的 17.3 万吨废弃物中，9% (1.5 万吨) 被错误分类，32%因严重污染无法被再生处理，总共有超过 40%的包装废弃物，从再生过程中剔除，并填埋或焚烧 (Brouwer et al. 2019)。



图 4 消费后塑料废弃物的收集和回收。PMD 为塑料、金属和纸基复合包装的缩写，图改编自 Brouwer 等人 (2019 年)

几家包装公司已宣布了面向可持续包装的创新方法。包括优化资源使用的设计，如：1) 降低包装石油基塑料材料的比例，2) 轻量化，提高可回收性和/或可重复使用性。多层多种材料的复合包装，给可回收性带来了特殊挑战。这类材料能够保护食物并延长保质期（作为包装的主要功能），却不适应当前回收系统。

框 1 可循环设计

一个优化资源使用的例子，也具有更高的可回收性，是用可再生材料，如 MFC（微纤维纤维素）或纳米纤维素替代纸基复合包装的铝箔层。MFC 用作油脂和氧气的生物材质阻隔层，也可作为生物降解膜替代纸板包装中铝和塑料淋膜（Stora Enso 2019）。通过替代这些材料，包装的碳足迹显著减少。

另外，Huhtamaki 普乐的 lidding laminates（www.worldstara-ward.com）和 Aronax 技术也着手减少铝箔层，用一层薄磁性颗粒取代铝箔，并更易从包装上分离（EMF 2018）。

使用再生材料的食品包装材料市场状况

根据欧洲化学工业委员会(CEFIC)数据，目前欧盟收集的塑料废弃物中，只有 15%重新回到欧盟市场。

由于缺少工艺和出于食品安全考虑，大多数非 PET 塑料食品包装无法回收再生用于新的食品包装。因此，它通常应用于食品包装以外，如建筑业和农业。

目前，只有 10%的再生聚合物达到食品级，其中大多数是聚对苯二甲酸乙二醇酯材料（PET）（Leardini et al 2021）。塑料回收主要通过物理回收进行：经过清洗和分类的塑料废弃物被重新熔化并加工成新的食品包装。然而，物理回收过程中，可能存在受污染的再生原料进入再生塑料，进而污染食品的风险因素。为防止此类包装材料进入市场，欧盟和美国制定了好几项关于食品接触材料(FCMs)的法律，包括塑料和再生塑料（De Tandt et al. 2021）。与食品接触的材料和物品，当全部或部分由再生塑料制成时，必须经过欧洲食品安全管理局(EFSA)的安全评估和欧盟委员会(European Commission)授权。rPET 树脂被美国 FDA 批准用于食品接触，而中国则不允许在食品包装中使用再生塑料。

目前市场上除了主流的食品级再生 PET 外，少量经化学回收工艺再生的 rPP (Packaging Europe 2021, SABIC 2020)也正进入欧洲市场(见框 2)。在美国，美国食品和药物管理局（FDA）也在 20 多年里，逐项批准用于食品接触的再生 HDPE (Custom-Pack 2018)。同样，在英国，从牛奶瓶中回收的 HDPE 也可用于生产新的牛奶瓶(Ellis 2019)。

框 2 用于食品包装的再生聚丙烯

瑞士乳制品公司 Emmi 正与 Borealis 和 Greiner Packaging 合作，生产由化学回收聚丙烯制成的 Emmi 咖啡杯。而再生聚丙烯技术目前仍处起步阶段，故经化学回收的聚丙烯产量有限。Emmi 通过与开发公司的早期协议，获得了一部分再生聚丙烯。未来，根据合适材料的产量，Emmi 的拿铁咖啡杯中的再生塑料含量将进一步增加。



Emmi 拿铁咖啡杯使用的经化学回收的材料，在质量平衡基础上，完全符合 ISCC(国际可持续发展和碳认证)标准，由于再生聚丙烯由化学回收工艺再生制成，可用作食品接触材料。

玛氏食品与沙特基础工业公司 (SABIC) 之间建立了类似构架的合作关系，为玛氏的宠物食品包装提供经化学回收的再生聚丙烯，其中 PP 薄膜结构由 Huhtamaki 普乐提供。

目前，由不同塑料聚合物或不同材料组合成的多层食品包装几乎没有被回收，因为这些层次难以分离。至于纸基复合包装，只有纸板部分，可在现有回收工艺中被回收再生，但根据规定，回收的纸纤维不能与食品接触 (Geuke 2021)。涂有经过验证的阻隔材料 (Virtanen 2022) 的再生纸板可用于食品包装。

目前，用于纸板和纸质食品包装中的塑料和铝箔的新的淋膜工艺，以及适用于混合塑料化学回收工艺，正在开发之中。这样，当材料完全解聚时，化学回收的聚合物可作为食品接触材料 (European Commission 2021)。

使用后包装的分类和回收

使用后的包装，通常是受到污染的废弃物，包含不同种类。它包括各种材料类型（如多层包装、混合物和复合材料），形状、颜色和尺寸差异很大。为保证质量一致，再生处理中心为其原料设定了质量标准，并通常配备分拣线，从废弃物原料中分拣出杂质。随着数字化和自动化发展，分拣技术过去十年中取得了显著进步，其识别能力和分拣速度都有提高。随着包装设计的改变（如添加光学追踪标记、避免多重材料和深色材料）和新型传感器的应用，自动分拣线能更好地区分不同的聚合物。目前，分类通常采用近红外 (NIR) 技术完成，而新的技术创新，如高光谱相机，可识别分类

各种颜色的塑料。在包装设计方面，数字水印正快速发展。HolyGrail 2.0 项目是一个广为人知的发展项目，在丹麦哥本哈根的一个材料回收设施中，该项目已进入示范阶段。覆盖在消费品包装表面的水印包含了多种信息，如包装类型、材料和用途（图 5）。在分拣线上使用高分辨率摄像机扫描消费使用后的包装，便可解码数字水印（Staub 2021）。



图上是表示清楚的夸张解码效果

图 5 Digimarc 的数字水印技术: (www.digimarc.com)

纸和纸板包装的回收、趋势和前景

纸或纸板的食品包装通常是一种复合材料，由 1-2 层纤维层（约 80-95%）、聚乙烯层组成，若是用于纸基复合包装，还会加上铝箔层（5-15%）。纸或纸板的食品包装（包括纸基复合包装）的回收已很成熟，一般以回收纤维部分为主。回收过程中，塑料通过洗涤从纤维中分离出来，纤维可用于生产新产品，如纸板箱、芯材、餐巾纸或记事本等。废纸通常可多次回收，但回收过程中，纸纤维会因机械磨损而变短。每多一次回收，纤维都会变短，使纸板更薄且强度更低。包括纸板在内的纸制品，实际可被回收 5- 7 次。之后，它可以打浆制成鸡蛋盒或进入末端处置。

含短纤维的再生纸污泥，可用于各种不同用途。例如，将其用作建筑材料补充剂或纳米纤维素的原料，或用于生物质生产（乳酸、脂质、纤维素）或沼气生产的基质（Peretz 等人，2020 年）。但上述这些解决方案尚未大规模商用。

收集的废纸板和纸包装，在既有回收系统中处理。该过程通常将废纸张与水 and 化学品进行混合分解。随后，将废纸切碎加热，通过筛网过滤，去除

可能仍存于混合物中的塑料（源自塑料淋膜纸），脱墨、漂白（如有必要）并与水混合。纸浆将用于制造新的再生纸。更先进的处理技术包括，使用光学传感器识别，并自动分拣棕色纸与其他纸张和塑料杂质。（<https://fiberpure.bulkhandlingsystems.com/>）。

然而，食品包装通常由一层或几层塑料和/或铝（纸基复合包装）复合。与纯纸盒或纸质包装相比，这使回收过程更具挑战。这类结构包装的回收，需要在专门处理淋膜材料的回收设施中完成。

纸和纸板回收过程的重点，是提高能效、减少材料损耗、增加智能分类技术，以及开发纸基包装回收中产生的铝塑膜的工业化用途。

关于水循环闭环

因此，再生纤维纸的生产耗水量明显低于原生纸工艺（Jung 和 Kappen 2014）。一些回收纸的造纸厂，其工艺实现了中水回用。然而，有害物质的富集及其产出物，使得进一步减少污水产生非常困难。在再生纸厂的水循环中，常见有害物质包括浆粉，盐化物，以及再生纸原料上的细菌在生产、储存和回收过程中产生的挥发性脂肪酸（VFA）等。这些会在整个造纸过程中带来问题，如降低纤维强度和产生气味等（Stetter, 2012）。膜处理工艺正发展为水循环闭环中的关键技术（Jung 和 Kappen 2014）。

大多数回收纸厂无法做到完全中水回用。通常，产生的废水可就地或由市政废水处理厂进行完全生化处理。许多处理措施可进一步减少水足迹。例如在马德里，回收纸厂与市政污水处理厂合作，生产所需淡水就由市政污水净化而来（见框 3）。

框 3.城市-工业的共生

国际纸业的马德里工厂生产再生纸箱板，通过与市政系统合作的闭环系统，其成为欧洲第一家 100%使用循环水生产再生纸的工厂。这意味着，每生产一吨纸的耗水量非常低。并且循环水可在工厂内部重复循环使用多达 13 次。联合污水处理厂还能产生每年 7 百万立方米的沼气，满足蒸汽锅炉 25%的电力需求。

实验室研究表明了利用再生纸废水生产沼气的可行性（如，Bakraoui et al. 2020, Bonilla et al. 2018）。但纸浆纸厂生物污泥使用的厌氧消化技术尚未实现工业化应用。据报道，由于纸浆和造纸厂生物污泥构成复杂且难以去除，以及潜在的有毒化学物质，使得其甲烷产量很低（Bonilla et al. 2018, Gonzalez-Estrella et al. 2017）。

纸基复合包装的回收

据 Eunomia 的研究（2020 年）。欧洲只有 20 多家专业回收厂能处理纸基复合包装。大多数工厂只能回收纸纤维，剩余铝塑膜被焚烧发电或为水泥工厂供能。

这个过程中，消费使用后的纸基复合包装在室温环境下被彻底水洗，纸纤维从铝塑膜上分离并溶解于水。铝塑膜碎片被收集起来以便进一步回收，而纸浆继续用于生产再生纸/纸板。

纸纤维占纸基复合包装 75%以上，水力制浆工艺最为常见，但也有利用完整的纸基复合包装生产建筑材料（如板材和瓦材）的工艺。近来，工艺开发一直致力于在纸纤维之外回收残留铝塑膜的流程。最简单的方法，包括加热凝集，挤出，获得可用于工业和消费品生产的铝塑颗粒或其他材料（如木质纤维素废弃物）。化学方法包括溶解聚乙烯并去除铝金属。

Robertson (2021) 建议，未来几年发展重点，可能是将纸基复合包装回收用于建筑材料，以达到 100%产出，相比而言，水力制浆仅能回收 75%的材料。但这样的工艺属于降级利用。

铝塑的回收

考虑到铝-聚乙烯复合膜相对较高的热值（约 40 兆焦每公斤）（Platnieks et al. 2020），铝塑回收主要集中在能量回收上。随着提升回收利用层级的决心，铝塑材料回收工艺蓬勃发展。其中包括使用热压工艺生产刚性板和生产热塑性复合材料（Martínez-Barrera 等人，2017 年）。

EXTR:ACT 是由欧洲主要的纸基复合包装生产商和灌装企业组成的联盟，该组织的目标是提高纸基复合包装中铝塑膜的回收利用。据 ACT 估计，目前为止，这些欧洲项目每年可回收大约 30%（约 5 万吨）纸基复合包装中的非纤维成分（<https://www.extr-act.eu/>）。

Ecoplasteam 在意大利的回收工厂（每年可处理 7000 吨铝塑膜）生产的 EcoAllene® 铝塑料（商品名）可像普通聚合物一样，进行注入、挤出、混合和复合，并再次循环利用。该工艺包括，通过制浆、沉降和离心，获得固体铝塑碎片，将其挤出并细分成颗粒，成分为 85%的 LDPE 和大约 15%铝的混合物。该材料可用于家用、园林工具和非食品包装等。

Recon Polymers 在荷兰同样生产 LDPE 和铝的混合颗粒，并开发了这种材料的各种应用。例如，一家荷兰生产商销售的喂鸟器，该工具由含铝聚合物制成。目前该项目仍处于试点阶段。2020 年 9 月起，Recon Polymers 公司开始运营一家回收工厂。预计到 2021 年，其铝塑年产能将达到 6000 吨。

Plastigram 公司的专利工艺用特定浓度和温度的甲酸水洗分离铝塑膜（Pelikan 2020）。Plastigram2019 年开始在捷克建设铝塑分离生产线。其还在波兰与利乐公司和斯道拉恩索公司合作以扩大生产规模，这将使波兰纸基复合包装的年回收能力从 25000 吨增至原先的三倍，到 75000 吨。在波兰及其邻国（包括匈牙利、斯洛伐克和捷克）销售的全部纸基复合包装都将有机会被回收利用。再生纤维会用于斯道拉恩索生产的再生纸板。分离的塑料和铝，将作为塑料颗粒和铝箔，重新用于生产。这两条生产线将于 2023 年初投入运营（Stora Enso 2021）。

Palurec 公司由纸基复合包装制造商在德国运营，采用水洗工艺分离铝塑，通过空气分馏从软化的 LDPE 中分离出聚丙烯和 HDPE。该工厂生产工业用的 HDPE、LDPE 和铝屑，从 2021 年初开始运营 (EXTR:ACT2021)。

纸杯回收

纸杯通常由 90% 的纸和 10% 的聚乙烯淋膜制成。纸杯使用的纤维一般较长，高质量的纤维最多可被循环回收 7 次。虽在技术层面，杯子是完全可回收的，但仍有很大一部分最终成为混合废弃物。同样，在美国，由于纸杯的塑料涂层，许多废弃物处理公司和市政部门不接受混合可回收物中的纸杯。而随着越来越多城市将纸杯回收纳入家庭回收计划，美国几家回收工厂已承诺增加纸杯回收量 (FPI 2021)。

与此同时，越来越多咖啡馆、零售商铺以及其他企业，直接与回收商签订合同。这些杯子在源头就近完成收集和打包，直接送到废弃物再生利用工厂进行高效大规模再生处理。随着一次性杯子使用增加，这种合作可能更普遍。2020 年，全球纸杯市场达到 2447 亿个 (IMARC Group 2021)。对纸杯的需求增加，缘于全球外卖服务和即食食品的增长趋势，也与越来越多的赶时间的消费者有关。

专业的回收工厂，可通过浮选技术，回收制浆后的塑料薄膜。回收步骤类似纸基复合包装。PE 涂层从纸浆中分离颗粒后，作为再生 PE 再度投放市场。杯子的回收产出率在 70% 到 90%，取决于单层杯还是双层杯以及使用的制浆系统。

与此同时，创新的包装技术正在进入市场，如水性涂层解决方案等。许多食品包装制造商正将可生物降解的纸杯投放市场，这些纸杯可在常规的回收纸厂进行再生处理或堆肥。这两种趋势在不久的将来可能不断增长。

塑料包装回收

欧洲每年产生近 3000 万吨塑料废弃物，且数量还在增加。食品包装占这些塑料废弃物的近 60% (Åkerman 和 Sundqvist-Andberg, 2021)。单独收集时，使用过的包装通过物理热处理回收用于生产塑料颗粒 (物理回收)，或通过将聚合物结构分解为化学品或单体/低聚物 (化学回收)，物理回收工艺在全球已成熟，而化学回收现在才开始全面商业化。

物理回收

塑料物理回收是指，在不明显改变材料化学结构 (研磨、洗涤、分离、融化、复合和造粒) 的情况下，将废旧塑料制品加工成二次原料。目前，它是欧洲回收塑料废弃物的主要方法。对聚丙烯 (PP)、聚乙烯 (PE) 或聚乙烯、对苯二甲酸酯 (PET) 等，它是一种成熟的塑料材料回收技术。

为保证再生料的质量，物理回收需精细分类成单类聚合物。因此，多层和复合包装通常不被现有回收体系接受。

框 4. 多层复合材料的物理回收

APK 公司的 Newcycling® 技术，是为数不多的已具商业规模的多层塑料的物理回收工艺之一，这是一种基于溶剂的回收工艺。它能在复合材料中选择性溶解所需聚合物，进而从多层复合材料及其他混合塑料中提取出所需的聚合物种类，获得可重新用于包装的 LDPE，并去除气味和杂质。APK 在德国拥有一家商业化运营的回收设施，专门生产塑料颗粒，年产能 8000 吨。APK 还计划在 2022-2023 年扩建一个年产能约 20000 吨的生产设施。另一个后起之秀是西班牙的 Repetco 公司，开发了一种使用加压蒸汽分层的工艺，用于 PE-PET 复合材料的回收。该公司正在西班牙阿尔巴塞特建造一座工厂，计划 2022 年底运营，预计年产能 45000 吨的 rPET。

化学（高级）回收

化学回收（在美国也称高级回收）目的是将塑料废弃物转化为化学原材料。它是一种化学或热化学过程（例如热解），其中聚合物的化学结构发生变化，转化为化学结构单元，包括单体、低聚物和高级烃，用作制造新产品的原材料，而不是用于生产燃料或能源。化学回收工艺不如物理回收工艺成熟，但行业合作和投资正在形成。根据 2019 年的一份报告，有超过 40 家的化学回收工厂在商业运营(Closed Loop 2019)。

“化学回收”一词，意味着经由各种技术，即经由热、压力、耗氧、催化剂和/或溶剂的某种组合，将塑料废弃物分解成燃料或新塑料的构件。例如，热解和气化使用热量来分解塑料，并隔绝氧气以防止燃烧。其他技术以溶剂为基础，如溶剂分解。

在欧洲，一些化学回收厂已作为试点或小型商业工厂启动并运行，生产的再生材料也已获得 REACH 批文。围绕塑料废弃物的化学回收技术发展突飞猛进，未来 5 年将取得重大进展。其主要基于热解技术，即在无氧的环境热条件下将材料气化。这项技术可将生物废弃物和塑料废弃物分解成有价值的基础化学材料，用来制造新产品。

化学回收工厂

Plastic Energy 是主要的化学塑料回收技术供应商之一。它在西班牙经营两个示范工厂，每个工厂年产能 5000 吨。其热解能产出 80-85% 的 TACOil、15% 的合成气和少量的炭，都可作为工业原材料。Plastic Energy 已与多家（石油）化工公司合作，建立合资企业或作为签约用户，如沙特基础工业、埃克森和道达尔。在法国、西班牙、荷兰和美国（德克萨斯州），至少有六家工厂正在建设或处于规划阶段，每年共可处理 15000-33000 吨塑料废弃物。预计实施时间为 2022-2024 年。TACOil 回收油已通过 REACH 化学品认证，

符合欧盟食品接触材料法规。它已用于联合利华的 Magnum 和 Knorr 品牌 (图 6)。



图 6. 使用 TACOIL 原料的食品级包装 (Monreal 2020)

Brightmark 公司在美国印第安纳州的一座年产能 10 万吨的热解工厂即将完工，并在韩国建设另一座工厂。下游客户分别为英国石油和 SK Global Chemical。BlueAlp 和 Pryme 的化学回收荷兰工厂计划在 2023 年和 2022 年投产，年产能分别为 30000 吨和 60000 吨 (Mapleston 2021a)，客户为壳牌石油。

水基技术

除了热解之外，水基回收技术也在不断发展。原理是，在较低温度中，不使用溶剂来完成回收，以降低生态足迹。总部位于英国的 Mura 公司与陶氏化学将在 2022 年完成其在德国的四条 HydroPRS Cat-HTR™ 生产线中的第一条，年产量 20000 吨。Mura 公司与三菱合作，预计 2023 年建成类似规模的工厂。该技术利用超临界水、热量和压力，将废塑料转化为有价值的化学原料和基础油，通过分解长链碳氢化合物提供氢气，来生产短链、稳定的碳氢化合物产品用于化工行业。

Aduro Clean Technologies 是拥有水基技术专利的加拿大公司，通过化学回收塑料，并将重质原油和可再生油转化为更高价值的燃料和其他回收化学品。Aduro 将与 Brightlands 合作，在荷兰林堡建成一座示范工厂，该工厂应用 Aduro Hydrochemolytic™ 技术 (HCT)，以每天一吨的规模，展示聚乙烯 (PE) 废弃物转化为化学原料的过程。与更传统的精炼技术 (如热解和气化) 相比，据报道，HCT 的优势在其较低的操作温度 (240-390°C) 且不依赖氢气生产，因而更受青睐 (Canadian Plastics 2021)。

催化热解

美国 Anellotech 公司的 Plas-TCat 技术使用一步反应的热催化工艺，将一次性塑料废弃物直接转化为基本化学品，如苯、甲苯、二甲苯 (BTX)、乙烯和丙烯，并用于塑料生产。该公司与 R Plus Japan Ltd. 和日本的塑料废弃物回收组织合作，预计 2027 年这种回收技术有望商业化。由于不使用催化剂，可无需使用蒸汽裂解器升级热解产品以获得所需成分。(混合) 塑料废弃物的非催化热解也是同理。非催化热解通常产生很大比例的蜡，从而限制其在后续 (石油) 化学工业中的直接使用，并令整个再生过程的环境足迹增加。

PET 的回收

目前，大多数食品级再生聚合物是聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)。

PET 通过清洗和重新熔化进行物理回收的方式已商业化，也可通过化学方法将其分解成其成分材料，用于制造新的 PET 树脂。

分拣之后，回收 PET 被研磨成碎片。碎片的纯度对保证再生塑料的价值至关重要。进一步的分离技术包括水洗和气选，以及在水中基于密度的浮选，即根据材料下沉或漂浮来分离杂质。

完成研磨、洗涤和分离后，对材料进行彻底冲洗，去除残留的杂质或清洁剂。在进一步加工（通常是熔化和挤出）前还需烘干。

熔化过滤可以通过去除之前分选中残留的非熔体污染物，进一步纯化材料。挤出的材料通过一系列筛网，形成颗粒，而未熔化的颗粒阻挡在筛网之外。颗粒状的塑料尺寸均匀，可重新引入制造过程 (LeBlanc 2020)。

作为物理回收的替代方案的解聚技术，虽已建立了食品级加工流程，加工效率一直提高，但也仍在开发中。瑞士公司 Gr3n 正开发微波技术来解聚 PET。目标是 2024 年底前建成一个年产能 3 万吨的示范工厂 (Mapleston 2021b)。Ioniqa 在荷兰拥有从 PET 瓶中提取单体材料的生产厂，年产能 1 万吨。此过程中，PET 是一种解聚工艺，使用溶剂（糖酵解）和可重复使用的离子铁磁催化剂 (Vilaplana 等人，2014 年)。此外，加拿大 Loop Industries 的工艺，使用溶剂和催化剂进行解聚 (Essaddam 2017)。该公司正与 SK Global Chemicals 合作扩大规模，在韩国蔚山建设一家工厂，计划 2022 年投入运营，预计产量 70000 吨/年。Loop 还与苏黎士合作，目标是在欧洲建立一个制造工厂，预计 2023 年投入使用 (Mapleston 2021b)。

法国的 Carbios 正扩大特殊酶解聚 PET 工艺的应用规模。目前正处于示范阶段（单次可循环 2 吨），目标是在 2025 年建成 4 万吨/年的工厂。

PET 的工业应用众多，许多包装和纺织品牌，已承诺增加再生 PET 在其产品中的比例。其中可口可乐计划，到 2030 年，在其饮料容器中使用 50% 的再生 PET。公司越来越认识到将 PET 回收到食品级产品中的紧迫性。再生 PET 原料供应正成为一个挑战，而再生工厂的 PET 废弃物原料质量普遍变低。与此同时，美国的回收率近年来一直持平或下降。

讨论

有迹象表明，扩大包装回收的规模面临多方面挑战，这些挑战越来越受到关注，我们也致力于克服它们。新指令新法规以及跨国公司，就可回收包装以及使用回收材料和可持续设计做出承诺，一方面已建立了回收和再生的行业合作平台，另一方面已创建了回收材料的潜在下游用户群体。

然而，扩大包装回收利用规模的主要障碍，不仅是回收能力，还有收集和分类基础设施。在许多国家，这类基础设施仍然不足。

此外，收集废弃物的基础设施到位时，只有消费者积极参与其中，并对环境意识和相关信息有基本了解，系统才会有效。回收利用的先决条件是对产生的废弃物单独分类收集；在这里，该系统很大程度上依赖于消费者和企业对废弃物分类的动力。尽管有意愿，但实际对可回收废弃物进行分类的消费者比例较低，而分类的可回收物通常含有大量不可回收的杂质（CITEO 2021， HSY 2019）。

实际的回收过程，预分类必不可少。大多数回收过程会产生一定比例废料，即收集到的不适合或严重污染的部分，例如含卤素的部分，这些会转移到回收物中，降低进一步使用的价值。在废弃物的物理回收处理中，这一比例可高达总原料的 30%。废料可通过化学回收，进一步循环再生。化学回收可用于更多不同品类原料的再生，然而，化学回收并非万能，仍需对废弃物预筛选，才能生产符合工业（再）使用质量标准的再生产品。回收流程本身与下游流程（蒸馏、卤素去除等）都会产生一定废料。因此，以当今现有技术，包装回收理论上甚至不能做到完全回收。比较投放市场的包装量与再生产品，很明显，实际的平均回收率远低于官方报告水平。在欧盟，当前的国家级报告，将从关注产生的包装量与收集的废弃物，转向剔除不符合处理条件的收集量的比例。提高实际回收率，是整个欧盟面临的挑战。

与此同时，可回收设计也被包装制造商重点提上日程，行业参与者加快了高潜力循环技术的发展。在包装层面，目标是设计包装，使其具备（IK 2021）：

- **可被消费者收集**——这意味着，它可以被消费者清楚地识别为塑料包装
- **可被再生工厂识别**——这意味着，它最终能被分拣到相应的可回收物部分
- **可通过最先进的回收技术被再生**——因此可根据市场需求生产再生材料。

改进回收过程（尤其是与混合塑料废弃物有关）的关键，是未来的分拣技术。例如数字水印、视觉识别或光学追踪剂。所回收技术都需要一定的投入量，才能生产出符合质量标准的再生材料。这会导致产生残差，现有技术无法进一步处理。未来，随着回收量增加，在经济和技术上，不同技术部署的有效层级联动，预计是可行的。

目前，仅有一小部分再生材料获批用于食品接触，主要是再生的 PET，不包括纸和纸板，但回收的纤维用于制造其他包装、软纸巾等。

随着目前化学回收的快速发展和新设施的建设，预计欧洲将在未来 2-3 年达到 20 万吨/年以上的综合产能，是美国的两倍以上，这将有力拉动再生食品级塑料市场。化学回收厂也将能处理多层材料，因为成规模的物理回收方法对多层材料几乎束手无策。全球范围内，化学回收是新鲜事物，针对这一技术，提供废弃物原料的基础设施，仍有很长的路要走。实际上，当前的技术供应商和投资者，通常与原料供应商（废弃物管理组织）合作，以确保其设施的原材料安全。

化学回收是更复杂的过程，与物理回收相比，通常需要更大的投资和更高的能源。化学回收可能不会成为未来塑料回收的主要途径，但可为废塑料的回收做出重大贡献，特别是对于不符合物理回收要求的部分。

为保证再生材料的可持续性，包装行业普遍采用 ISCC plus 认证。它通过质量平衡方法，保证了包装中使用材料的准确性和完整的可追溯性，并确认加工的材料实际来自可持续（回收或可再生）来源。

总体而言，当今的回收行业充满活力。随着向可持续实践的转变，以及自动化技术的应用，废弃物行业的高潜力回收技术也在加速发展。其技术、经济和可持续发展的可行性都将提升，并推动整个价值链上的参与者在其商业模式中更多采用可持续的举措。