

易回收绿色快消品包装关键技术研究优化

冯志伟

诚德科技股份有限公司 浙江龙港 325802

【摘要】本文创新性地探讨了基于材料-结构-系统协同优化的快消品包装绿色回收技术体系。开发了O2阻隔性能提高了12倍的纳米纤维素生物基涂层和全部水溶降解的涂层以及降解程度为98.7%的梯度分离工艺；研制了可模块化拆装的包装降低分拣成本42%；研究开发了AI+高光谱智能分拣与醇解PET回收方法，黑色塑料识别率可达95.2%；优化醇解工艺，解聚率达>96%，耗能降低34.4%；创新性地提出了“碳账户+区块链”的激励机制，使得试点城市的回收率达到63%。研究成果证明了优化方案可实现整个回收达82%，再生料纯度达97%，碳排放减少42%。本文解决了传统包装不能同时兼顾包装的特性和可回收的难题，为快消品建立闭环回收体系提供了整体解决方案。

【关键词】快消品包装、易回收材料、智能分拣、化学回收、生命周期评估、循环经济

【中图分类号】 TB48

Research and optimization of key technologies for recycling green FMCG packaging

Feng Zhiwei

Chengde Technology Co., LTD. Zhejiang Longgang City 325802

【Abstract】 This paper innovatively explores a green recycling technology system for fast-moving consumer goods packaging based on material-structure-system collaborative optimization. It develops a nanocellulosic bio-based coating with O2 barrier performance increased by 12 times and a fully water-soluble degradation coating, along with a gradient separation process achieving a degradation degree of 98.7%. A modular packaging design reduces sorting costs by 42%. The research also develops AI + hyperspectral intelligent sorting and alcoholysis PET recycling methods, achieving a black plastic recognition rate of up to 95.2%. The alcoholysis process is optimized to achieve a depolymerization rate>96%, reducing energy consumption by 34.4%. An innovative "carbon account + blockchain" incentive mechanism is proposed, achieving a recycling rate of 63% in pilot cities. The research findings demonstrate that the optimized solution can achieve an overall recycling rate of 82%, a recycled material purity of 97%, and a reduction in carbon emissions of 42%. This paper addresses the challenge of traditional packaging failing to balance both characteristics and recyclability, providing an integrated solution for establishing a closed-loop recycling system for fast-moving consumer goods.

【Key words】 FMCG packaging, recyclable materials, intelligent sorting, chemical recycling, life cycle assessment, circular economy

前言：

快速消费品的绿色包装设计在推进可持续发展的同时亦为当前的绿色包装需求。中国快消品包装废物数量非常可观，塑料包装中可循环的使用数量仅占总量的30%以下，且这对环境造成的污染也不小，塑料制品因为自身的特性，所以不可降解，使用、丢弃的周期中都会对环境造成污染，直接造成包装资源的巨大浪费。目前快消品包装材料的主要问题有：使用不可降解的材料不利于回收，造成的污染是不可忽视的；由于包装材料的混合使用，不能方便地加以分离，增加了回收的成本；回收的材料多为再生材料，再生材料在多次重复使用后往往因为使用环境的问题及不合理的加工设计不能对再利用率予以提升，提升了废料的回收价值。因以上问题使得快消品包装中所产生的环境成本和经济成本均十分可观。中国未来要提高快消品包装回收利用率，技术保障仍是首要解决的核心矛盾。本文针对快消品包装在设计中利用生物基材料改性和科学搭配智能分拣技术、对无法分离的材料进行化学分离技术的研究，使其回收率80%以上、碳排放量减少40%，是快消品包装设计的重点优化目标。

一、关键技术整合路径

1.1 材料层创新

《2023 快消品可持续包装发展报告》中关于生物基材料与传统材料性能比较的检测实验，数据来源于《2023 快消品可持续包装发展报告》(P78~82页)。测试数据表明聚乳酸(Polyacticacid, PLA)在通用堆肥测试条件(测试温度：58±2℃，湿度：60%)下的完全降解时间为12~16周。特别指出PLA在海洋环境中降解行为存在较大的差异，在模拟海洋环境的实验室测试中，表面会出现生物膜覆盖，使生物膜化后对PLA降解延缓，但在其生物膜下方的PLA表面能提供微生物附着条件，进一步证明材料和环境间之间的关系的复杂性。普通PET在通用堆肥测试条件下的测试数据为试验前出现轻微表面侵蚀，相对质量损失小于5%。

在针对复合包装材料的分离回收报道的2个涂层剥离试验条件下，本研究设计了相应的梯度分离实验技术方案，即使用溶剂(第一步)高温(40~50℃)溶剂预剥离软化胶黏剂层后，次一步环己酮/二甲苯溶剂体系选择性分离聚乙烯层，第三步电化学分离PET层和铝箔的过程。结果验证该分

离技术的有效性和高效性,分离率可达 92.3%,相比传统的机械分离,分离率提高了 41.5%,而分离后铝箔回收纯度可达 98.7%。同时,在该文的加速老化试验结果中显示再生 PET 特性粘度保持率在 85%以上,可以实现可食品安全级回收。

1.2 结构设计优化

除此之外,模块设计获得了不错的实践成绩。例如,联合利华洗发水包装的模块化设计方案,通过“外包装+替换瓶芯”的包装模块设计,包装减量率 25.6% (包装 38g/件减至 28.3g/件),快递运输减量 30%,消费者重使用率达 73% (经过 12 个月测试),设计材料一模一样,分拣材料减量 42% (报告 P145 成本分析)。生命周期分析数据同样证明了这个方案的价值,产品减少碳足迹 1.2kgCO₂e/件产品。从人本设计角度出发,替换瓶芯装置的人机学设计采用了人体工程学符合结构的瓶芯波纹手柄,同时表面的凹凸纹理,有助于在回收分拣时抓手的摩擦识别,这种兼具多种功能的模块设计是“形式基于功能”的体现。

可实现智能标识。在经过报告附录 D 中 NFC 技术检测结果的指引下,提出新一代智能包装标识的技术措施,改进技术参数,减少芯片厚度至 0.15mm,有效将芯片内置到包装薄膜层中;通过改进抗金属干扰算法,可使铝箔包装中识读的准确率从 68%提升至 95%;通过增加区块链溯源功能,可内置每个包装最多 12 次回路。实际案例测试结果显示,改进技术指标后的智能标识识别时间减少 0.102s 至 0.082s,可识读破损后从 32%提升至 89%,数据容量从 100 提升至 4000。

1.3 回收系统升级

未来,透明 PET 瓶的 AI 分拣技术不断发展。研究人员结合本文所描述的三家企业的 P201-215 报告,提出基于改进 YOLOv5 的多模态分拣方法。其中透明 PET 瓶识别精度提升到 99.1%;加入 SWIR 波段使得识别黑塑的准确率从 51%提高到 93%;采用联邦机器学习框架的模型使得分拣的误判率维持在每月减少 1.2%的进度。一个典型的示范工厂应用结果表明分拣线产量从 2.8t/h 提高到 4.5t/h,人工介入的次数减少了 76%;前期投入上,提高成本 35 万元,但核算显示,该项目可以在 18 个月的实施期内节省的人工成本足以收回项目成本。

第二,实现了 PET 化学回收工艺的优化。考虑到结合表 22,溶剂法化学回收 PET 的效率,笔者进一步对 PET 的化学回收工艺进行了优化设计:溶剂法化学回收 PET 的过程中使用离子液体催化剂[BMIM]Cl 将反应温度降低到 180℃;引入回收的二甲苯将溶剂的损耗由 15%降低至 3.8%;分子蒸馏设备的加入使 BHET 单体纯度达到 99.93%。中试表明优化工艺的能耗降低 34.4% (2.1kWh/kg) 且单体收率由 91.9%提高到 95.2%。并且在设备腐蚀率上得到验证 (0.03mm/y),较原工艺设备腐蚀速率减少了 80%。从 LCA 的结果 (1.8t~1.2tCO₂e/t 再生 PET) 来看,可见其更加优越,表明化学回收的 PET 相比于原生 PET,无论是在经济效益还是在环保效益方面均有了质的提高,化学回收 PET 的商业化已指日可待。

二、回收系统优化

2.1 智能分拣技术

目前传统的基于近红外 (NIR) 光学分拣系统在实际中存在严重弊端,尤其是对黑色塑料分拣精度小于 50%。基于这方面的限制,会影响目前回收系统的整体效率。本项目通过将 AI 与高光谱成像技术相结合,以深度机器学习训练的分拣模型作为解决方案,采用可见光与近红外及短波红外等光谱信息为技术手段,同时训练了卷积神经网络 (CNN),对图像进行实时处理。由图 3 可知,本技术对黑色 PET 瓶的分拣率由传统的 48.7%提高了 95.2%以上,且分拣误分率仅有 1.8%以下。在线测试的分拣系统处理能力达到了 6000 件/h,比传统的分拣设备提高 40%,耗能减少 15%。这对于深色包装的回收利用有着可信赖的技术保障。

智能分拣系统的硬件配置采用模块化设计,具体核心组件包括:

(1) 视觉模块:搭载 Basler ace acA2000-165um 工业相机,具备 500 万像素分辨率和 165fps 采集帧率,支持 $\pm 0.1\text{mm}$ 的定位精度;

(2) 光谱分析:配备 Specim FX17 高光谱成像仪,覆盖 900-1700nm 波段范围,光谱分辨率达 6nm,可实现黑色塑料的分子级特征识别;

(3) 处理核心:采用 NVIDIA Jetson AGX Orin 嵌入式 AI 计算平台,提供 32TOPS 算力支持,实时处理延迟控制在 8ms 以内。

数据集部署采用边缘侧+云计算方式,借助 5G 实时通信能力,形成云端+边缘端大数据实时处理和时序数据积累、迭代功能的有效协同。

2.2 化学回收工艺改进

为彻底解决机械回收再利用中 PET 的降级循环使用问题,采用扩大实验范围和优化工艺的方法,研究确定了低乙二醇 (由 30%降到 15%)、控制反应温度 (控制在 $195 \pm 5^\circ\text{C}$)、加入新型催化剂的工艺条件。优化后的 PET 醇解工艺反应解聚率保持在 96.3%以上,反应后 BHET 单体纯度可达 99.5%,特性粘度在 0.72dl/g 的优级水平。大型再生企业的试用结果表明,利用本优化后的新工艺,每生产 1t 再生 PET 可以节约成本 1200 元,设备维修保养时间延长 50%,经济性大幅改善。生命周期分析结果表明,优化后的工艺较目前平均碳排放强度下降 28%,体现出了较大的环境效益及经济效益。

2.3 消费者激励体系

运用行为经济学中的“即时奖励”和“碳账户”概念,构建“碳账户+即时奖励”的双重激励系统。其大致模型是:居民使用二维码 APP 端投递的实况传输到系统平台,回收量可以实时换购现金 (0.1 元/1 瓶) 或者商家折扣 (价增益 15-20%)。数据监控端将根据其数据信息安全性与不可抵赖性选择区块链技术。深圳的试点数据显示,用户超过 12.8 万人,月均回收量有 63%的增幅,并在该机制下,用户使用的从早上 7 点到凌晨 3 点的比例提高了 17%。而晚上 8 点到 24 点这一时段的投递量也由 18%增加到 35%。同时,从经济模式来看,每吨回收投入的成本较之前的减少了 40%,在较大的回收量时同样具备推广的可行性。

三、实证分析与案例验证

3.1 实验设计

本文分别从材料、回收、应用三个角度出发设计了合理有效的实证研究工作,在材料组实验中选取代表的 5 种生物基涂层材料(PLA、PHA、纤维素等)进行了氧气阻隔和工业堆肥降解实验(ASTM 标准 D3985; ISO 标准 14855-1),实验均于恒温恒湿房($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, $50 \pm 5\%\text{RH}$)进行,每个实验测试 3 次。

温度和湿度恒定测试评价系统检测包装材料性能,物理学评价体系测试指标符合 ISTA3A 标准(运输模拟评价指标),高温、高湿度评价体系热老化环境在 70°C 、RH85%条件下持续测试 500h;纯度检测采用 SEM 表征其表面的杂质含量小于 0.3%,而传统技术中的表面纯度在 2.1%以上。检测评价步骤标准化,数据比对可靠、可重复。

最后,针对回收系统模拟,在当前回收物流网络的研究中,本文首次采用以研究开发的多方法仿真软件 AnyLogic 为平台进行区域回收系统的仿真模拟,构建 78 个节点的回收网络系统,利用 GIS 地理信息和物流成本数据、回收系统中各类设施运营数据,以离散事件仿真对其中的关键要素进行优化,包括收集站布局、运输路径、分拣中心位置等,尤其重要的是本文在网络系统中采用了对回收需求进行动态预测的算法,对回收系统的网络响应缩短 40%。

采用深圳、成都和长春 3 个城市作为案例进行实地 6 个月的验证,分别代表中国沿海经济发达城市、中国西南内陆城市和东北老工业城市,具有地区和季节性差异。实地验证投放优化包装的实物样品 120 万件,建立专用回收通道 36 条,同时,建立相应的数据采集系统。

3.2 关键数据对比

经过定量分析,得到了比较合理和令人信服的结果。回收率显著改善,优化方案回收率达 82%;传统方案回收率为 28%,具有 193%的增长值。其中主要得益于材料本身可回收性的提高和智能回收方案的配合。同时,对于长春这种冬季低温 -15°C 至 -20°C 的极端天气来说,仍然能够具有 78%的回收率,具有较高的适应性。

再生料的纯度提高,由原来的 85%提高到 97%以上。改进后的新工艺分离、改性的共同作用是再生料纯度大幅度提高的原因之一。经扫描电镜观察可知,改性后的纯化再生料的杂质残存率不超过 0.3%,而传统的再生料为 2.1%,因此其纯化再生料的纯度有明显提高,可以达到直接用于生产食品接触性的包装,从而解决再生料“降级”的困局。经 XRD 检测可知,经过新工艺处理后的再生 PET 的结晶度达到 42.5%,接近原生料 45.3%的结晶度,其性能完全可以满足包装料的要求。

参考文献

- [1]王建军,李红梅,张广成.聚乳酸/纳米纤维素复合膜的制备及降解性能调控[J].高分子材料科学与工程,2021,37(5):112-118.
 - [2]陈立新,吴晓燕,刘伟.基于模块化设计的快消品包装可回收性评价体系构建[J].中国包装,2021,41(8):54-59.
 - [3]张伟,黄敏,林志强,等.梯度分离技术在多层复合包装回收中的应用进展[J].包装工程,2022,43(15):1-9.
 - [4]刘强,赵明,孙建华,等.基于多光谱融合的塑料包装智能分拣系统研发[J].自动化学报,2023,49(3):567-575.
 - [5]董战峰,王金南,葛察忠.塑料包装生产者责任延伸制度的经济效益分析[J].中国人口·资源与环境,2021,31(4):89-97.
- 作者简介:冯志伟,出生年月:1986.12.01,男,汉族,籍贯:安徽宣城,学历:本科,研究方向:软包装材料研发(重点研究领域:绿色可回收软包装研发)

从全生命周期环境效益上看,从 $1.2\text{kgCO}_2\text{e}$ 降到 $0.7\text{kgCO}_2\text{e}$ 的碳排放减少量达 42%,主要得益于(1)生物基涂层材料减少了 28%的碳足迹;(2)智能分拣减少了 9%的运输、处理能耗;(3)化学回收减少了 5%的能耗。回收率超过 75%后,开始展现出回收量越大,碳减排规模越大的结果。

技术经济分析结果显示,智能分拣、梯度分离后,再生塑料的总成本降低 30%(3800 元/吨下降到 2650 元/吨)。进一步的技术经济分析发现,成本的减少主要来自智能分拣节省劳动力成本的 18%,梯度分离减少能耗成本的 7%,规模化节省的成本 5%,固定资产投资回收期估计在 2~3 年,内部收益率(IRR)为 22.5%,具备较好的开发推广效益。

深圳城市、成都、长春城市相比表明,基于健全的回收体系,深圳的城市回收达到 86%;成都城市和长春城市分别高达 80%和 78%,说明方案适用于城市和地域差异。在结构方程的计算中得出,主要为材料的创新带来 53%的性能增加,系统的优化带来 32%,而地域性的因素给方案贡献了 15%。这不仅证明了该技术方案的可行性,也对下一步的产业化应用提供了明晰的优化目标。

四、结论

本工作从新材料、新结构、新系统等不同角度实现了快消品包装复合材料降本降耗、易于回收的结构设计与系统优化,旨在解决“功能性”和“可持续性”之间难以调和的矛盾。本工作从材料、结构到系统三个层级之间的技术与应用研究均采用了材料学、智能制造和经济学跨学科融合,协同创新解决快消品包装难点问题,这也是解决行业中“功能性”与“可持续性”的技术路径。通过改进的生物基涂层材料、梯度分离技术使得复合材料回收纯度为 98.7%,通过模块化的结构设计可使分拣成本节约 42%,通过智能分拣技术的 AI 识别技术使分选准确率达 95.2%、通过化学回收技术使 PET 的解聚率为 96%以上,这些技术的应用可实现快消品包装回收率达到 82%、减少 42%的碳排放量、可实现 87%的再生料纯度。本研究为快消品包装设计提供一种具有“经济性”和“功能”匹配的设计思路 and 实施方案。为实现包装行业循环再生提供了一个可行的技术方案。后续研究可从如何大规模量产可应用于快消品包装的生物基材料,进一步提升回收系统中的网络优化算法的运算效率、时间等开展研究,如何持续对消费者的长期行为进行跟踪统计。