

废旧地膜资源化研究进展

彭浩雨¹ 任铁真^{1*} 张锦妮辉¹ 范卫² 邓书礼³ 张婷婷³

1.新疆大学化工学院, 新疆 乌鲁木齐 841000

2.新疆赛格环保科技有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830017

3.新疆能源科技创新研发中心有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830063

[摘要]废弃农用地膜的回收处理是农业可持续发展中的关键环节,它不仅有助于缓解白色污染问题,还能促进资源的循环利用和生态环境保护。根据回收地膜所含杂质的程度不同,目前主要形成了两种处理模式:一种是高纯地膜处理模式,其纯度通常达到99%以上,杂质含量极低,适合高效回收和再利用;另一种是高杂地膜处理模式,含有大量秸秆、沙土等杂质,处理过程复杂且挑战较大。这两种模式在技术路线上存在明显区别。文中将对这些模式在技术路线、产物应用和成本结构上的显著差异进行系统分析,以期对废弃物资源化发展提供新思路。

[关键词]聚乙烯; 低温分解技术; 废旧地膜; 催化热解; 废弃物资源化

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17727

中图分类号: X712

文献标识码: A

Research Progress on Resource Utilization of Waste Plastic Film

PENG Haoyu¹, REN Tiezhen^{1*}, ZHANG Jinnihui¹, FAN Wei², DENG Shuli³, ZHANG Tingting³

1. School of Chemical Engineering and Technology, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang, 841000, China

2. Xinjiang SEGE Environmental Protection Technology Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830017, China

3. Xinjiang Energy Technology Innovation and Research Development Center Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830063, China

Abstract: The recycling and treatment of discarded agricultural plastic film is a key link in sustainable agricultural development. It not only helps alleviate the problem of white pollution, but also promotes the recycling of resources and ecological environment protection. There are currently two main processing modes based on the degree of impurities contained in recycled plastic film: one is the high-purity plastic film processing mode, which usually has a purity of over 99% and extremely low impurity content, suitable for efficient recycling and reuse; Another type is the high impurity plastic film treatment mode, which contains a large amount of impurities such as straw and sand, and the treatment process is complex and challenging. There is a clear difference in the technical roadmap between these two modes. The article will systematically analyze the significant differences in technical routes, product applications, and cost structures among these modes, in order to provide new ideas for the development of waste resource utilization.

Keywords: polyethylene; low temperature decomposition technology; waste plastic film; catalytic pyrolysis; waste resource utilization

引言

随着农业现代化的快速发展,农用地膜在提高作物产量和保护土壤方面发挥着重要作用,但大量废弃地膜的产生带来了严重的环境问题,如土壤污染、生态破坏和资源浪费。这些问题不仅威胁农业生产的可持续性,还加剧了生态环境的压力。长期以来,我国对农用地膜要求较低,在GB 13735—2017《聚乙烯吹塑农用地膜覆盖薄膜》颁布以前,市场上流通的地膜厚度多为0.004~0.006 mm。这种厚度的地膜易老化破碎,与土壤杂草混合,分拣难度大^[1]。回收的混合物中约80%为沙土杂草,总体热值较低,无法直接焚烧。聚乙烯成分结构稳定,不易自然降解,成为我国农业生态环境保护的突出问题。本文基于机收废弃地膜的纯度差异,系统探讨高纯地膜处理模式和高杂地膜处理模式。

1 废旧地膜产生情况

农膜是继化肥、农药、种子后的第四大农业生产资料,可分为棚膜和地膜。其中,地膜覆盖技术已被广泛用于农

业生产,地膜的使用能够有效防止养分流失,使作物水分利用效率提高20%~30%,增产50%左右^[2]。但随着地膜用量与使用年限的增加,地膜污染问题也愈加严重^[3]。新疆地区农业种植面积大,机收地膜以棉花种植为主,每亩地使用地膜量由传统地膜约5kg,到加厚地膜7kg,因此导致耕层地下膜累积量增加。第二次全国污染源普查结果显示,我国用膜地区地膜亩残留量4.5公斤^[4],Yoshito Ohtake T K等^[5]通过推算指出:在填埋条件下,60μm厚的聚乙烯薄膜完全降解所需时间长达300年,且薄膜填埋过程中产生的薄膜碎片、微塑料等,会随生态循环进入土壤、水源,对生态环境、生物生存带来不可预知的威胁。据不完全统计,机收地膜受机械设备影响,一般含有30%~40%的秸秆,20%~40%的土壤,这为机收地膜的分选和使用增加了成本,机收地膜二次造粒成本高达5千元^[6],市场竞争力弱。因此,高效、经济地回收处理废弃地膜已成为当前农业环保领域的迫切需求。催化热解和

低温气化节能技术的联合使用,能够在最低成本下实现效益最大化,为废旧地膜处理提供了新思路。

2 高纯地膜的资源化转化

高纯地膜处理采用“除杂-粉碎-筛分-催化热解”的工艺流程。其中除杂部分,旋风分离与磁选联用技术可去除 99% 以上的沙土及金属杂质,满足后续催化热解进料标准;催化剂有降低反应活化能的功效,表现为降低反应能耗,极大地缓解了解热技术中能耗高的问题。催化剂能够提高反应效率、调控反应历程,是影响催化热解的重要因素。催化剂制备环节, Song 等^[7]通过流态化焙烧制备纳米 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 催化剂,实现废地膜高效裂解产油,将轻油($\text{C}_5\text{--C}_{20}$)含量提至 89.21wt%。废旧地膜经催化热解后,转化为热解气和热解油两部分。热解气主要含 H_2 、 CH_4 、 $\text{C}_2\text{--C}_4$ 烯烃及 CO/CO_2 等,是优质的气体燃料,具有较高的热值。当它们在氧气存在下燃烧时,能够释放大量的热能。这一特性为热解技术本身提供了重要的能源解决方案:通过将产生的部分或全部热解气引入燃烧系统,利用其燃烧释放的热能,可以直接为热解反应器或其他工艺环节提供所需的热量。这种“以气供热”的模式,实现了系统的能量自持或部分自持,显著降低了对外部能源的依赖,提升了整个工艺过程的热效率和运行经济性,是热解技术实现能量平衡和可持续运行的核心优势;提高催化热解可以得到约 70% 液体产物,其中碳数分布在 $\text{C}_7\text{--C}_{11}$ 之间(如图 1)。但初生热解油因含氧量高,导致热值偏低、酸性强、稳定性差,难以直接用作高效燃料。为克服此缺陷,催化提质是其转化为实用燃料的核心步骤。

催化提质过程首先基于对初生热解油系统化的理化性质分析,精准识别油品特性与缺陷。同时,严格对比目标燃料的关键参数:农用柴油^[8]需满足十六烷值、冷滤点要求;航空燃料^[9]则需符合密度、冰点、闪点、芳烃含量等严苛标准。在此基础上,紧密结合目标发动机的实际需求进行深度优化,脱除氧原子,提升氢碳比和热值,改善稳定性和燃烧性能。经此精制转化获得的高品质成品燃料,可满足高端应用:作为清洁燃料用于农机设备,可以提升能效并减少农业碳足迹;作为符合航空燃料替代或掺混传统航煤,能够显著降低航空业碳排放,增强能源韧性。该模式初始投资较大(设备专业化程度高),但产品附加值高,长期回报率可观,尤

其适合大规模集中处理场景。

3 高杂地膜的资源化转化

高杂地膜采用“低温负氧离子气化-氧化吸收”的处理路径。其中,电子辅助分解工艺能够在保持物质成分不变的前提下进行有机固废的资源化转化^[10]。该技术对原料纯度要求较低,具有通用性强,反应可控,能耗低的特点^[11]。此工艺主要反应组分负氧离子对有机固废的分解均有促进作用,因此反应物投放无需分类,地膜可掺杂秸秆、沙土等一并投入炉中进行处理,有机质进行反应随尾气排出,无机成分自然沉降,实现自分拣和选择性转化;作为反应及传热的重要部分,电子注入速率将决定反应进行程度,电子辅助分解工艺通过对反应进程的调控等效转换为对电子注入速率的调整,使反应进程能够根据反应物类型及实际分解情况进行实时调整,大大提高了反应的灵活性;同时,反应中唯一耗能组分电子发生器功率仅为 0.4W,解决了传统分解方式的高能耗问题,降低了地膜处理成本,促进了低温分解技术的推广应用。氧化吸收部分主要分为喷淋吸收及尾气净化,经检验,喷淋系统处理后,气体碳含量可减少 99% 以上。而后,静电除尘装置将除去剩余气体携带的液体组分,得到的干燥尾气进入催化阶段,利用自主研发的 CuMn/CA-2 催化剂对尾气中微量 CO 组分进行催化氧化,最后尾气成分近似为空气,可作为反应组分通入负氧离子炉或洁净排放。

废旧地膜经低温分解技术处理后,剩余产物仅有无机灰分、吸收液。气化残余的无机灰分沃土粉作为纳米级无机材料,主要成分为硅、铝、铁等矿物元素,具有独特的微孔结构与巨大比表面积,将其掺入土壤后,可显著改善土壤团粒结构,使土壤孔隙度增加 15%~25%,从而大幅提升保水保肥性能,减少养分淋失;氧化吸收得到的液体营养液绿萃液富含高浓度的有机物及多种微量元素,不仅能显著提升作物产量与果实品质,还能有效替代 30%~50% 的传统化肥施用量,既降低了农业生产成本,又减轻了化肥过量使用导致的土壤板结^[12]与水体富营养化风险。两种产物均可直接应用于种植环节,形成循环农业模式。低温操作节省能耗,运营成本低,但催化剂等耗材需要定期更换,土地改良收益对应的直接经济回报较低,但环境效益显著,可获得政策支持。

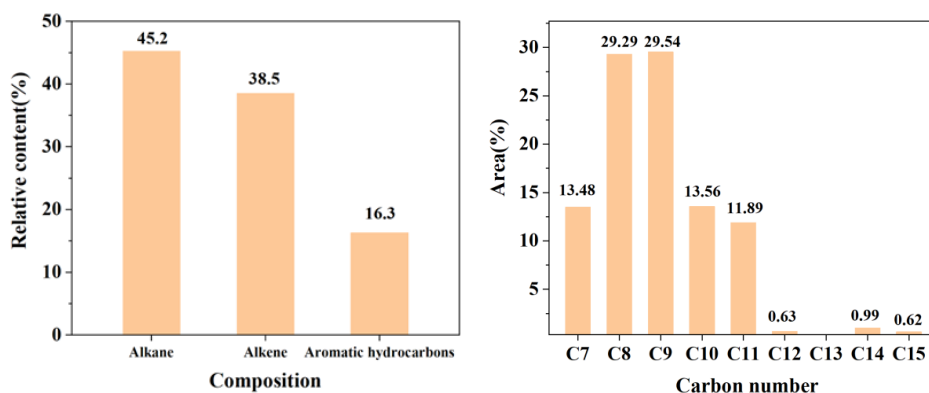


图 1 (左) 地膜热分解液体组分和 (右) 液体组分的碳数分布

通过将绿萃液与沃土粉协同应用于大田种植或设施农业,不仅实现了农作物全生育期的营养精准供给与根际环境优化,更构建了“废弃物-资源-农产品”的完整物质循环链条。这种创新模式使农业废弃物资源化利用率提升至90%以上,在降低化肥农药投入的同时提高作物抗逆性,真正实现了经济效益与生态效益的双重提升,为破解农业面源污染难题、推动绿色低碳农业发展提供了可复制的技术路径。该模式初始投入适中,运营成本可控,特别适合分散式处理和资源匮乏地区,其环境效益可转化为长期经济价值。

4 高纯地膜与高杂地膜处理模式比较

对于地膜回收体系完善、资金充裕的地区,高纯地膜模式可创造更高经济价值;对于回收体系尚不完善、注重生态环境效益的地区,高杂地膜模式更具实用性。理想状态下可建立两种模式的协同系统,根据原料品质分流处理。理想情况下,可构建高纯与高杂模式协同的分级处理系统:根据地膜收集后的杂质含量进行分流,高纯度原料进入催化热解链生产高值燃料,高杂质原料则走气化—资源化路径。若进一步研发可兼容两类物料的柔性化处理系统,实现设备共享和流程优化,则可通过规模化效应和催化剂循环利用降低高纯模式单位成本。同时,应建立基于全生命周期评价(LCA)的环境效益补偿机制,对高杂模式带来的正外部性予以经济补偿,并积极开发高杂产物(如特种营养液、土壤调理剂)的高值化应用渠道,提升其市场竞争力。

表1 高纯地膜与高杂地膜处理模式比较

比较维度	高纯地膜模式	高杂地膜模式
原料要求	高纯度(>90%)	可接受高杂质含量(>70%)
主要产物	高附加值燃料	土壤改良材料
初始投资	高	中等
技术复杂度	高	中等
二次污染	有	无
适用规模	大规模集中处理	分散式处理
投资回报周期	较长(但单位收益高)	较短(环境效益显著)
政策依赖度	较低	较高

总之,两种处理模式各具优势(表1),实际应用中应根据当地条件选择或组合使用,以实现经济效益与环境效益的最大化。未来随着技术进步和政策完善,机收地膜处理成本有望进一步降低,推动农业循环经济发展。

5 结语

作为农业大国,在农业迅速发展、作物产量提升的同时也应重视相关生产资料的生产与处置。科技的生命力在于服务人民,尽管各类可降解地膜相继问世,但在相当一

部分地区,传统地膜仍被大量使用,催化热解与低温分解技术的联用方式为废旧地膜乃至有机固废资源化利用开辟了新发展路径,期望能为废弃物处理提供新思路,为民族振兴提供坚实的科技保障。

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发项目(2022B02038);新疆庭州科技团队育才项目,以及新疆乌鲁木齐红山小组团项目(B241018001)。

[参考文献]

- [1]靳拓,薛颖昊,张明明,等.国内外农用地膜使用政策、执行标准与回收状况[J].生态环境学报,2020,29(2):411-420.
 - [2]詹慧龙.小小的地膜大大的功效[J].农村工作通讯,2011(23):66-67.
 - [3]李艳芳.可回收地膜覆盖种植玉米的应用[J].云南农业,2021(4):56-57.
 - [4]王泽农.以生态环境高水平保护推动农业农村高质量发展[N].农民日报,2022-06-16(08).
 - [5]Yoshito Ohtake T K, Hitoshi Asabe, Nobunao Murakami, et al.Oxidative degradation and molecular weight change of LDPE buried under bioactive soil for 32–37 years[J].Journal of Applied Polymer Science,1998,70(9):1643-1648.
 - [6]刘琪.废旧聚乙烯基农用地膜回收造粒工艺设计及工厂化研究[D].甘肃:西北民族大学,2022.
 - [7]Song Z-H,Muhammad I,Ren T-Z,et al.Preparation of Al_2O_3 Nanoparticles via Fluidized Roasting and Their Application in the Pyrolysis of Spent Mulching Film for Hydrocarbon Production[J].ACS Sustainable Resource Management,2025,2(3):435-445.
 - [8]能源行业农村能源标准化技术委员会.农用醇醚柴油燃料:NB/T 34013-2024:[S].北京:中国农业出版社,2024:9.
 - [9]中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院,空军油料研究所,中国航空油料有限责任公司.3号喷气燃料:GB 6537-2018[S].北京:中国标准出版社,2018:16.
 - [10]Cui M-J,Muhammad I,Ren T-Z,et al.Preparation of SiO_2 Photocatalyst via Electron-Assisted Thermal Decomposition of Rice Husks and its Application for Chromium (VI) Determination[J].Silicon,2025,17(3):571-583.
 - [11]彭浩雨,任铁真,张锦妮辉,等.低温分解技术处理农业固废研究进展[J].自然科学研究,2025,2(2):22-25.
 - [12]杨彪.程海流域生态保护及综合管理对策[J].绿色科技,2020(22):32-35.
- 作者简介:彭浩雨(2006—),女,汉族,河北邢台人,本科在读,新疆大学化工学院,研究方向:碳基固废资源化。