

低温分解技术处理农业固废研究进展

彭浩雨¹ 任铁真^{1*} 张锦妮¹ 范卫² 邓书礼³ 张婷婷³ 马文新⁴ 王帅⁵ 韩荣⁵

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

4.新疆慧尔农业集团股份有限公司, 新疆 昌吉 831100

5.新疆轻工职业技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830021

[摘要]我国作为农业大国, 农业固废年产量高达 40 亿吨, 其资源化利用对缓解能源压力、促进可持续发展具有重要意义。与传统技术相比, 低温分解技术通过负氧离子与羟基自由基的协同作用, 实现了低温条件下农业固废的高效分解与资源化, 具有能耗低、适用范围广、产物可循环利用等特点。文中系统梳理了农业固废资源化技术发展及其挑战, 重点分析了电子辅助低温分解技术的原理、优势与应用前景, 以期对农业固废资源化技术的优化与推广提供参考。

[关键词]农业固废; 废弃物资源化; 低温分解; 负氧离子; 羟基自由基

DOI: 10.33142/nsr.v2i2.16965

中图分类号: X7

文献标识码: A

Research Progress on Low-temperature Decomposition Technology for Treating Agricultural Solid Waste

PENG Haoyu¹, REN Tiezhen^{1*}, ZHANG Jinnihui¹, FAN Wei², DENG Shuli³, ZHANG Tingting³, MA Wenxin⁴, WANG Shuai⁵, HAN Rong⁵

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

4. Xinjiang Hui'er Agriculture Group Co., Ltd., Changji, Xinjiang, 831100, China

5. Xinjiang Industry Technical College, Urumqi, Xinjiang, 830021, China

Abstract: As a major agricultural country, China has an annual output of up to 4 billion tons of agricultural solid waste. Its resource utilization is of great significance in alleviating energy pressure and promoting sustainable development. Compared with traditional techniques, low-temperature decomposition technology achieves efficient decomposition and resource utilization of agricultural solid waste under low-temperature conditions through the synergistic effect of negative oxygen ions and hydroxyl radicals. It has the characteristics of low energy consumption, wide applicability, and product recyclability. The article systematically summarizes the development and challenges of agricultural solid waste resource utilization technology, with a focus on analyzing the principles, advantages, and application prospects of electronic assisted low-temperature decomposition technology, in order to provide reference for the optimization and promotion of agricultural solid waste resource utilization technology.

Keywords: agricultural solid waste; waste resource utilization; low-temperature decomposition; negative oxygen ions; hydroxyl radical

引言

我国资源丰富, 总量大, 种类多, 但人均占有量少, 开发难度大, 总体上资源紧缺, 合理高效地利用有限的资源成为当下中国面临的一大挑战。对农业固废的资源化利用不仅有利于减轻环境负担, 更能减弱能源供应压力, 农业废弃物治理迫在眉睫。当前主流技术(如还田、堆肥、焚烧)存在能耗高、二次污染等问题, 而低温气化节能技术通过电子辅助分解机制, 利用高活性物质促进农业固废在温和条件下的高效分解, 为农业固废处理提供了新思路。

1 农业废弃物资源化传统技术

由于农业精细化、规模化的影响, 农业废弃物种类逐渐增加, 产量不断提高, 据统计, 中国每年农业废弃物产

出量超过 40 亿吨^[1-2]。然而, 废弃物利用率却不足 30%, 大量废弃物被随意丢弃或排放到环境中, 对城乡生态环境造成巨大影响^[3-4]。在众多农业固废中, 秸秆还田^[5]具有处理方式多样、操作简便等特点, 能有效促进农田系统的元素循环, 但还田各流程大多以经验为参照, 缺乏严谨的监测、处理体系, 以至效果良莠不齐, 过量的秸秆还田更可能导致土壤形成大颗粒团聚体, 增大土壤孔隙, 在灌溉和降雨条件下, 极易产生土壤和养分淋失现象, 造成土壤结构恶化和作物产量降低^[6-9]; 对于大量种植业与养殖业中的固废, 堆肥技术^[10], 热分解^[11]、焚烧发电^[12]等都被广泛应用。堆肥技术有效地借助了微生物的作用, 将废弃物进行初步处理后还田, 不仅能够改良土壤结构、提高作物

产量,对环境也有清洁作用,但在此过程中,农业废弃物同时也作为微生物培养的基底,对废弃物成分、堆肥方法、温度、湿度、时间等要求较高,适用性窄,堆肥过程中温室气体的大量排放使得堆肥技术不适于在当下大幅推广^[10];秸秆还田、微生物堆肥主要体现循环思想,相比之下,焚烧发电更侧重于资源化,洪斌等^[12]通过对垃圾焚烧发电流程的分析,论证了焚烧发电可以快速将生物质废弃物减量化并产生能源的观点,不仅实现了农业废弃物的资源化,更有助于解决当下资源危机。

上述技术占地面积广、环境污染大,热分解处理技术要求高;新型技术如等离子气化^[13]、超临界水氧化法^[14],虽然处理效果好,流程较简单,但技术尚未成熟,且成本较高,暂时无法得到大规模推行。另外,将废弃物作为添加剂,开发型煤添加剂^[15],高炉助燃剂^[16]等材料,能够在一定程度上缓解废弃物处理压力,同时提高工业产能及产品质量,但这些技术对空间、设备、废弃物种类有着极高要求,仍需进一步优化。郝靖宇等^[17]通过类比相关文献,指出了热解温度与生物炭成分有关,表明热解炭化工艺可以在保证农业废弃物高效资源化的前提下有效减少有害物质的产生,但其较高的设备要求及高能耗使得推广面临挑战;相比于大规模的焚烧处理,气化可以就地处理,更为灵活。王振名^[18]通过对生活垃圾等固废进行建模分析后指出生物质经气化后可以产生氢气、一氧化碳等用以供能,气化过程温度较高,能使二噁英等有害物质分解,环境效益强,但气化技术能耗约 0.3~2.0MJ/kg,炭化技术能耗更是高达 1.5~5.0MJ/kg,高能耗必将制约其发展推广。

2 低温气化节能技术

负氧离子低温分解技术主要利用电子发生器向空气

中注入电子,使空气中气体分子结构发生变化,产生羟基自由基、负氧离子等高电极电位的活性物质,促进固体废弃物的彻底分解^[19-20]。设备底部的陶土层在初期蓄热后,为系统内的有机物脱水和挥发分释放等吸收过程提供热量,有机固废形成积碳后到达设备底部,其持续分解释放的热量一部分供给陶土层吸收热量,形成辐射热中心场,另一部分热量供给系统,参与有机物脱水、成碳等过程^[20]。固废在处理过程中无需辅助热源。装置内部温度自下而上递减,依次形成具有成碳、分解、干燥、脱水功能的区域,最后由装置上方排出的气体温度可降至 100℃ 以下,分解产物以气体形式排出,在另一装置中通过喷淋得到弱酸性吸收液,经稀释后可反哺农业。剩余气体中 99% 为空气,以及 1% 左右的 CO、CO₂、CH₄、H₂ 等不凝混合气体,经催化净化后可以作为重新返回装置(如图 1 所示)。

Cui 等^[21]利用负氧离子辅助分解技术在不改变物质成分的前提下实现了稻壳废弃物的低能耗转化。随着下压式反应的深度进行,稻壳中的有机质在反应系统内分解,剩余的无机物 SiO₂ 形成方石英和鳞石英晶体结构,说明羟基自由基的存在可以实现温和环境下的高能量供给。当物料接近辐射热层, SiO₂ 发生玻璃相转化,得到非晶态 SiO₂,与传统燃烧与热解不同,有机固废借助辐射热环境,在低能耗下羟基自由基能氧化废弃物,将其完全分解,达到废弃物减量化、资源化的目的。

于此之外,负氧离子低温分解技术也使废弃物的分解过程更加可控。在此技术中,作为反应及传热的关键部分,对电子注入效率的控制将对废弃物燃烧过程产生极大影响。电子注入效率的提升将使得废弃物的分解反应更易发生,高温分解区扩大,反应效率提高,废弃物分解更加彻底。同时,这种技术的适应性更强,可应用范围更广。

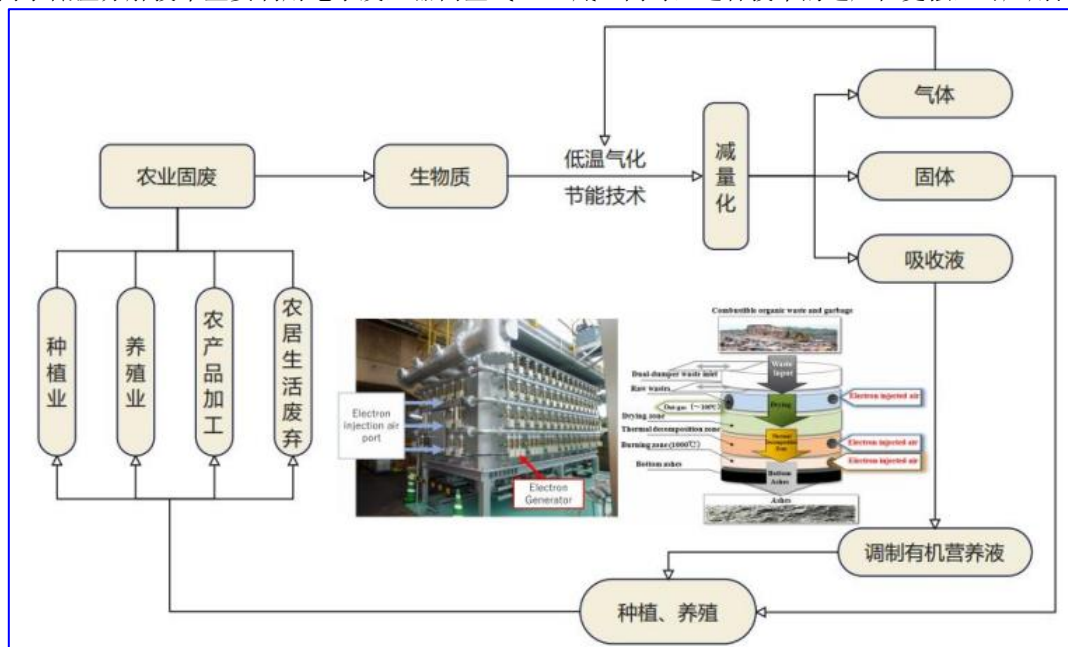


图1 低温气化节能技术流程

通过调节通入气体的组成成分,本技术可利用于各种废弃物的处理。立足于不同种类废弃物的组成结构,对通入气体含氧量、含水率的调整使尾气成分变得可控,符合当下绿色中国的建设需求。与传统气化中以升温达到物质分解的方法相比,电子辅助分解法更倾向于利用物质独特的性质,使物质相互作用达到废弃物分解减量化的目的。电子辅助分解技术的应用,使原本需要高温高压的分解过程^[22]得以在常压低温下进行,不仅减少了处理过程的能耗,也降低了对装置的要求,炉体无需耐火砖,仅用单板焊接构造,装置成本降低,大大提高了处理进程的安全系数;农业固废经分解处理后,产物仅有无机灰分和气体。经过适当处理后,灰分和气体均可得到有效利用。

3 电子辅助分解产物特性

有机固废进入系统后,有机物以气体形式经冷凝、吸收、除尘、净化单元后,99%的有机组分以焦油和有机溶液形式收集。经过负氧离子处理得到的无机物粒度细,具有较高的孔隙度,不仅可以作为设备蓄热层的储备材料,也可以回田使用,达到保墒保水目的,改善土壤板结程度,并且无机组分中含有钾、硅、铝、钙等多种无机元素,如钾是农作物生长必不可少的营养元素,可以提高酶活性,促进氮磷肥的增产效果,增强农作物保水、吸水的能力,提高作物抗逆性,改良土壤理化性质,提高作物产量,提升作物品质^[23-24],同时,无机物中含有农业种植所需的中量和微量元素,如果应用在农业种植,势必能有效补充农作物需要的营养成分;同时,与焚烧后剩余无机物相比,电子辅助分解产物的高孔性和无结焦与结块的特点,可以作为高温耐火砖的原料^[25],经过加工处理制成硅系耐火砖,用于焚烧回转窑内衬,减少高温及腐蚀对回转窑设备的危害^[26],从而实现再次利用。

有机固废分解后的气体经吸收与除尘处理,含有羧基、酚基、含氮的各类有机分子,以及氨基酸组分,可以作为有机营养液,调节植物生长、改良土壤性质、抗菌防虫。这与生物质热解冷凝液得到的木醋液类似,使农业固废重新回归土壤,以促进农业发展^[27]。但由于生物质热解过程受植物和工艺限制,高温冷凝收集的液体中含有焦油组分,需要经过长时间静置分离后才能使用。而电子辅助分解尾气在低温环境中进入吸收单元,水溶液中几乎不含有焦油分子,因此可以快速在农业环境中使用。相比于焚烧、堆肥等传统处理方式,电子辅助分解技术不仅避免了高温焚烧产生的二噁英、氮氧化物等有害气体污染,还克服了堆肥过程中耗时长、效率低、易释放甲烷等温室气体的缺点。其产物可直接作为液态肥料施用,显著提升资源利用率,同时减少土壤和水体污染风险,为农业固废的可持续管理提供高效、环保的解决方案。此外,该技术通过低温操作,有效保留生物活性成分,如酚类和氨基酸,进一步增强了

其在土壤改良和植物抗逆性方面的应用潜力。

4 结语与展望

低温分解技术能耗低、适用范围广、装置简单,其在农业固废处理中的应用不仅做到了高效减量化,更能促进农业发展,提高经济效益,前景十分广阔;但仍处于实验阶段,在实际生产中仍未实现大规模应用。未来,我们将进一步贴近生产实际,加强产研一体化,使技术走入社会、造福社会。今后随着科技的不断发展,对低温分解技术的深入探索有望使其在废弃物处理领域扮演关键角色,助力人类生产生活向绿色化、可持续发展方向迈进。

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2021D01A03);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]刘坤.农业废弃物资源化利用的现实意义与对策建议[J].环境与发展,2017,29(5):254-256.
- [2]杨少杰,李欣苗,李艳,等.尾菜烧制木炭处理技术[J].现代农业科技,2020(6):161-162.
- [3]王强强,周良田,王凤娟,等.农业废弃物在农业绿色循环发展中的应用[J].绿色科技,2018(19):179-182.
- [4]Koul B, Yakoob M, Shah M P. Agricultural waste management strategies for environmental sustainability [J].Environmental Research,2022(206):112285.
- [5]孙乐,景媛媛,蒋恒,等.农作物秸秆还田研究现状与展望[J].中国草地学报,2024,46(11):130-140.
- [6]Wei Q, Xu J, Sun L, et al. Effects of straw returning on rice growth and yield under water-saving irrigation[J].Chilean journal of agricultural research,2019,79(1):66-74.
- [7]徐岩.有机肥优化土壤微域环境的机制研究[D].吉林:吉林农业大学,2003.
- [8]王如芳,张吉旺,董树亭,等.我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果[J].应用生态学报,2011,22(6):1504-1510.
- [9]姬强,马媛媛,刘永刚,等.秸秆生物质炭对土壤结构体与活性碳分布、转化酶动力学参数及小麦生长的影响[J].生态学报,2019,39(12):4366-4375.
- [10]卞荣军,李恋卿.生物质废弃物处理与农业碳中和[J].科学,2021,73(6):22-24.
- [11]Uwaoma R C, Schröer B J, Strydom C A, et al. Kinetics, thermodynamics, and thermal decomposition characteristics of co-pyrolysis of municipality solid waste residue hydrochar and $< 1.5\text{g}/\text{cm}^3$ fraction of South African discarded fine coal[J].Bioresource Technology Reports,2022(18):100998.

- [12]洪斌,张凯,王彦军,等.垃圾焚烧发电技术研究进展及其环境效益[J].当代化工研究,2024(15):90-92.
- [13] Sun C-W, Shen J, Ren X-M, et al.Research progress of plasma gasification technology for solid waste treatment[J]. Acta Physica Sinica,2021,70(9):095210.
- [14] Pereira M B, Botelho Meireles de Souza G, Romano Espinosa D C, et al.Simultaneous recycling of waste solar panels and treatment of persistent organic compounds via supercritical water technology[J].Environmental Pollution,2023(335):122331.
- [15]李毓婷.含碳固废作型煤添加剂的研究及型煤特性分析[D].山西:山西大学,2012.
- [16]魏汝飞.高炉喷吹废弃油脂的可行性及前景[J].节能与环保,2012(3):64-65.
- [17]郝靖宇,陈淑娴,陈祥,等.热解炭化技术在污泥处置中的应用与展望[J].环境工程,2024,42(9):261-275.
- [18]王振名.生活垃圾等固废的气化模拟与含水率特性分析[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2024.
- [19]刘志浩.一体式错流旋转填充床传递特性与应用研究[D].北京:北京化工大学,2022.
- [20] Kobayashi Y, Ismail T M, Kobori T, et al.Experimental investigation on the effect of electron injection into air for thermal decomposition of solid waste[J].Applied Energy,2021(295):116999.
- [21]Cui M-J, Muhammad I, Ren T-Z, et al.Preparation of SiO₂ Photocatalyst via Electron-Assisted Thermal Decomposition of Rice Husks and its Application for Chromium (VI) Determination[J].Silicon,2025(17):571-583.
- [22]郭怡君,李军,黄宏宇,等.有机固体废弃物热解技术及热解气组成综述[J].新能源进展,2023(2):106-122.
- [23]毛麟瑞.农作物为什么要施钾肥[J].化工之友,2000(2):45.
- [24]赵风兰,刘彩玲.矿物质土壤调理剂的研制与应用[J].浙江农业科学,2015,56(12):2061-2063.
- [25]马淑龙,康剑,杨晨,等.水泥窑用不同铝硅系耐火砖抗碱侵蚀性能研究[J].耐火材料,2023,57(2):131-138.
- [26]周清.危险废物焚烧系统耐火材料应用分析[J].有色冶金设计与研究,2021,42(5):42-44.
- [27]杨柳,唐光木,张云舒,等.农林废弃物热解木醋液的农业应用研究进展[J].江苏农业科学,2024,52(18):18-25.
- 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。