

Material flow analysis of urban domestic waste co-treatment system

Wei Qiao¹ Xiaoke Guo² Bin Sun¹ Di Yang¹

1. School of Energy and Power Engineering, Northeast Dianli University, Jilin, Jilin, 132012, China

2. Northeast Electric Power Design Institute Co., Ltd., Changchun, Jilin, 130000, China

Abstract

Solid waste treatment is the process of converting waste into transportable, storage and utilized resources through physical, chemical and biological methods, and its core goal is to achieve harmlessness, reduction and recycling. As the most difficult type of “three wastes” to dispose of, common technologies involve landfill, incineration and biological treatment. China attaches great importance to the disposal and utilization of solid waste, and has successively promulgated relevant laws and regulations, and the collaborative disposal and utilization of solid waste industry in various industries has developed rapidly. At present, the co-disposal of solid wastes such as domestic waste, kitchen waste, landscaping waste, and municipal domestic sludge has been widely studied and applied. Solid waste treatment aims to be harmless, reduced and recycled, so scholars have applied material flow and energy flow analysis methods to solid waste treatment research.

Keywords

solid waste treatment; collaborative processing; Resource utilization

城镇生活废弃物协同处理系统物质流分析

乔伟¹ 郭晓克² 孙斌¹ 杨迪¹

1. 东北电力大学能源与动力工程学院, 中国·吉林 吉林 132012

2. 东北电力设计院有限公司, 中国·吉林 长春 130000

摘要

固体废弃物处理是通过物理、化学及生物等方法将废物转化为可运输、贮存和利用资源的过程, 其核心目标是实现无害化、减量化和资源化。作为“三废”中最难处置的一类, 常用技术涉及填埋、焚烧及生物处理等方法。我国高度重视固体废物处置利用工作, 陆续出台了相关法律法规, 各行业协同处置利用固体废物产业迅速发展。目前, 生活垃圾、餐厨垃圾、园林绿化废弃物、市政生活污水污泥等固体废物的协同处置得到了广泛的研究与应用。固体废弃物处理以无害化、减量化、资源化为目标, 因此学者们将物质流、能量流分析方法应用于固废处理研究。

关键词

固体废弃物处理; 协同处理; 资源化利用

1 引言

本文基于固体废弃物协同处置系统的物质转移路径, 通过分析系统投入产出关系, 对协同处理单元及生产工序模块的物质流进行系统解析。协同处理系统是以生活垃圾焚烧为核心, 其他多种废弃物处理项目之间的共生协作, 如污泥干化、餐厨垃圾处理项目产生的干污泥、残渣、沼渣等作为生活垃圾焚烧厂原材料。协同处理系统以多种生活废弃物为原材料, 通过以垃圾焚烧发电为核心的项目间的协同, 将废

弃物转化为再生资源, 实现了“资源—产品—再生资源”的循环经济模式。

2 固体废弃物资源化协同处理系统物质流分析

2.1 生活垃圾与餐厨垃圾协同处理系统物质流分析

本文生活垃圾与餐厨垃圾协同处理系统^[1]采用“焚烧+厌氧发酵+沼液和渗滤液协同处理+沼渣焚烧+沼气提纯”技术路线。系统处理规模为生活垃圾 2700 t/d, 餐厨垃圾 200 t/d, 厨余垃圾 300 t/d。

通过将生活垃圾与餐厨垃圾协同处理与单独处理的对比, 在餐厨垃圾单独处理中, 分选出的固相物料, 需要由垃圾收运车外运处置, 而在协同处理中厨余垃圾分选出来的杂物可以直接送入焚烧炉中, 相比单独处理更为方便。生活垃圾单独处理时焚烧炉中产生的炉渣为 557.53t/d, 协同处理

【作者简介】乔伟(2000-), 男, 中国河南南阳人, 硕士, 从事固废资源化利用协同处理研究。

【通讯作者】杨迪(1987-), 男, 中国吉林吉林人, 硕士, 讲师, 从事固废资源化利用协同处理研究。

时由于餐厨垃圾中筛上可燃物、分选杂物、挤压固形物、沼渣、固渣等物质送入焚烧炉中,使得炉渣增加至 591.09t/d,焚烧炉排出的炉渣可以进行再生利用、用作填埋场的覆盖层以及建筑材料的原料,可以降低环境负荷、节约资源。

2.2 多种固体废弃物资源化利用协同处理系统物质流分析

在多种固体废弃物协同处理系统中:生活垃圾焚烧处理规模为 2700 t/d;餐厨和厨余垃圾处理规模分别为 200 t/d 和 300 t/d,采用厌氧发酵处理,产生的沼气净化后出售;市政污泥干化系统将 200 t/d 含水率 80% 的湿污泥干化至含水率 40%,干化后污泥量为 66.7 t/d,与生活垃圾混合焚烧;建筑垃圾资源化模块处理规模为 1370 t/d,包括再生机制砂、免烧砖、水稳料和商品混凝土;园林绿化废弃物处理模块每天处理 68.5 t 木本类废弃物,产生 54.9 t 生物质颗粒燃料。

从多种固体废弃物协同处理的物质流来看,餐厨垃圾沼液脱水后的清液和生活垃圾渗滤液经处理后可直接送入建筑垃圾处理系统,用于生产再生水稳料。建筑垃圾单独处理时水稳料产量为 701.91t/d,而协同处理后增至 2041.94t/d,可用于道路加固、停车场硬化等工程,减少资源负荷。此外,余热利用产生的蒸汽可用于三相提油和厌氧发酵,产生的沼气可用于炊事、发电、供暖等多种用途,显著提升资源利用效率。建筑垃圾除土过程中分离的底泥可作为燃料送入生活垃圾焚烧炉,生活垃圾余热蒸汽则用于园林垃圾烘干,制成高热值颗粒燃料,实现资源最大化利用。

3 协同处理系统评价指标

构建一个全面的城镇生活废弃物协同处理系统评价指标^[2-3]体系,能够从多个维度对废弃物处理系统进行科学、客观的评价,为系统的优化和改进提供有力依据。通过这些

指标的综合分析,可以有效提升废弃物处理系统的整体效能,推动城镇生活废弃物处理的高效、环保和可持续发展。

3.1 减量化效果评价方法及评价指标

随着废物产生量的增加,废物处理系统的消纳能力面临挑战,尤其是废物填埋处置环节。由于城市土地资源紧张,无法新建填埋设施,垃圾填埋场剩余库容是城市的稀缺资源,在实际管理当中,对处理过程减量化的关键诉求是进入填埋场的处置规模。因此,本项目采用物质流分析方法,设置废物减量率(Waste Reduction Rate, WRR)指标,衡量废物处理流程的减量化效果。

$$WRR = \frac{W_T - W_L}{W_T} \times 100\% \quad (1)$$

其中, W_T 为入厂垃圾总量, t; W_L 为最终填埋处置的废物量, t。

3.2 资源化评价方法及评价指标

城市生活废弃物处理过程可以产生多种资源类产品,不同的生物质废物需要不同处理技术。本文采用资源利用效率(S_r)来评价,计算方法为:

资源利用效率指单位资源化产出所需的废弃物量,计算公式为:

$$S_r = \frac{S_s}{W_T} \times 100\% \quad (2)$$

式中, S_r 为资源回收率, S_s 为资源化产出量, W_T 为原生废物总量, t, 同式(1)。

3.3 无害化指标

3.3.1 碳排放指标

如表 3 所示,根据 IPCC 指标,确定多种城镇生活废弃物协同处理系统碳排放指标。

表 1 城镇生活废弃物处理系统减量化指标

序号	类别	入厂垃圾(t)	废物量(t)	WWR(%)
1	生活垃圾焚烧处理	3902	86.5	97.8
2	餐厨垃圾厌氧发酵处理	500	49.14	90.1
3	生活垃圾和餐厨垃圾协同处理	4402	91	97.9
4	市政污泥干化焚烧处理	200	14.84	92.6
5	建筑垃圾	2192	4.12	99.8
6	园林废弃物	68.5	0	100
7	城镇生活废弃物协同处理	6862.5	98.9	98.5

表 2 城镇生活废弃物处理系统资源化指标

序号	类别	$S_s(t)$	$WT(t)$	$S_r(\%)$
1	生活垃圾	928.2	3902	23.8
2	餐厨垃圾	387.2	500	77.4
3	生活垃圾和餐厨垃圾协同	1307.7	4402	29.7
4	市政污泥	0	200	0
5	建筑垃圾	2187.7	2192	99.8
6	园林废弃物	54.9	68.5	80.1
7	城镇生活废弃物协同处理	4430.1	6862.5	64.6

表 3 碳排放指标

碳排放清单		计算公式	参数
间接碳排放	药剂	$E_{m,CO_2} = \sum K_{mi} \times EF_{mi}$	<ul style="list-style-type: none"> E_{m,CO_2}: 使用药剂产生的 CO₂ 排放量, kg; K_{mi}: i 药品消耗量, kg; EF_{mi}: i 药品 CO₂ 碳排放系数, kg CO₂/kg, PAM 取值为 20、FeCl₃ 取值为 8.3、石灰取值为 1.74、NaOH 取值为 1.17、Ca(OH)₂ 取值为 0.975、活性炭取值为 6。
	电力	$E_{e,CO_2} = \sum K_{ei} \times EF_{ei}$	<ul style="list-style-type: none"> E_{e,CO_2}: 耗电产生的 CO₂ 排放量, kg; K_{ei}: 耗电量, kW · h, 通过比能耗 × 干基 (DS) 得到; EF_{ei}: 电力 CO₂ 碳排放系数, kg CO₂/(kW · h), 取 0.6012。
	燃油	$E_{h,CO_2} = \sum K_{hi} \times EF_{hi}$	<ul style="list-style-type: none"> E_{h,CO_2}: 燃油或热量产生的 CO₂ 排放量, kg; K_{hi}: 燃油燃烧量或所需热量, 转化为能量单位 GJ; EF_{hi}: 燃油或热量 CO₂ 碳排放系数, kg CO₂/(GJ), 柴油的 IPCC 推荐值为 72.753 kg CO₂/(GJ), 即 2.77 kg CO₂/kg。
直接碳排放	厌氧消化	$E_{a,CH_4} = \eta \times Q_{CH_4} \times \frac{16}{22.4} \times 21$	<ul style="list-style-type: none"> E_{a,CH_4}: 厌氧消化过程中 CH₄ 不可控泄漏产生的碳排放量, kg; η: 沼气收集管路中 CH₄ 不可控泄漏量, 取 5%; Q_{CH_4}: 厌氧消化 CH₄ 产量, m³; 16/22.4: CH₄ 质量与 CH₄ 体积的换算系数, kg/m³; 21: CH₄ 温室气体增温潜势。
	焚烧	$E_{in,CO_2} = Ms \times EF_{CO_2}$	<ul style="list-style-type: none"> E_{in,CO_2}: 焚烧产 CO₂ 造成的碳排放量, kg; Ms: 污泥或餐厨干基质量, t; EF_{CO_2}: 焚烧 CO₂ 排放因子, 污泥或餐厨为生物源, 生物处理或焚烧产生的 CO₂ 不计入碳排放总量, IPCC 参考值为 0。
碳存储	厌氧发酵	$E_{cs,CH_4} = Q_{CH_4} \times 16/22.4 \times (1-\eta) \times 50\% \times 50100/3600 \times 0.6012 - 2.75 \times Q_{CH_4} \times 16/22.4 \times (1-\eta)$	<ul style="list-style-type: none"> E_{cs,CH_4}: 厌氧消化产甲烷用于发电的碳储存, kg; Q_{CH_4}: 厌氧消化 CH₄ 产量, m³; 16/22.4: CH₄ 质量与 CH₄ 体积的换算系数, kg/m³; η: 沼气收集管路中 CH₄ 不可控泄漏量, 取 5%; 0.6012: 电力 CO₂ 碳排放系数, kg CO₂/(kW · h)。
	焚烧	$E_{cs,power} = \sum M_i \times LHV_i / 3.6MJ/kW \cdot h \times 0.2205 \times 0.6012$ $LHV_i = HHV_i - 2594(9H_i + W_w)$	<ul style="list-style-type: none"> $E_{cs,power}$: 焚烧发电碳储存, kg; M_i: 污泥或餐厨干基质量, kg; LHV_i: 污泥或餐厨低位热值, MJ/t DS; HHV_i: 污泥或餐厨高位热值, MJ/t DS, 餐厨垃圾取值为 18828、污泥取值为 11140; 0.2205: 热 - 电回收效率; 0.6012: 电力 CO₂ 碳排放系数, kg CO₂/(kW · h); H_i: 污泥或餐厨干基含氢比例, 餐厨垃圾取值为 7.04%, 污泥取值为 0.88%; W_w: 污泥或餐厨干基对应含水比例。

表 4 城镇生活废弃物处理系统碳排放指标

	间接碳排放 (t)			直接碳排放 (t)		碳储存 (t)		总碳排 (t)
	药剂	电力	燃油	焚烧	厌氧消化	焚烧	厌氧消化	
生活垃圾焚烧处理	53.8	141.2	1.5	351	9.7	647.4	64.2	-154.4
餐厨垃圾厌氧发酵处理	2.1	16.8	0	0	10.2	11.5	61.1	-43.5
生活垃圾和餐厨垃圾协同处理	57.8	165.7	1.6	372	12.5	682.4	120.6	-193.4
市政污泥干化焚烧处理	0	8	0.1	0	0	0	0	8.1
建筑垃圾	0	1.9	0	0	0	0	0	1.9
园林废弃物	0	5.8	0	0	0	0	0	5.8
城镇生活废弃物协同处理	60.3	190.1	1.8	388	13.2	711.5	136.6	-194.7

3.3.2 飞灰率

飞灰率是指统计报告期内，焚烧飞灰产生量占入厂垃圾的百分比，按公式(3)计算：

$$Q_{fr} = \frac{T_{fr}}{W_T} \quad (3)$$

式中：

Q_{fr} ——飞灰率；

T_{fr} ——统计报告期焚烧飞灰产生量，单位为吨(t)。

3.3.3 炉渣率

炉渣率是指统计报告期内，炉渣产生量占入厂垃圾的百分比，按公式(4)计算：

$$Q_{lz} = \frac{T_{lz}}{W_T} \quad (4)$$

式中：

Q_{lz} ——炉渣率；

T_{lz} ——统计报告期焚烧炉渣产生量，单位为吨(t)。

表5 城镇生活废弃物处理系统飞灰率和炉渣率指标

序号	类别	飞灰率(%)	炉渣率(%)
1	生活垃圾焚烧处理	2.2	19.98
2	餐厨垃圾厌氧发酵处理	0	0
3	生活垃圾和餐厨垃圾协同处理	1.5	13.5
4	市政污泥干化焚烧处理	0.8	6.7
5	建筑垃圾	0	0
6	园林废弃物	0	0
7	城镇生活废弃物协同处理	1.2	10.8

3.4 协同处理与单独处理指标对比

为了分析协同处理系统相对于独立处理系统的优势与区别。本文按标准处理量对协同处理系统和独立处理系统在减量化、资源化和无害化三个方面进行了对比分析。

表6 协同处理与单独处理指标对比分析表

指标	协同处理	单独生活	单独餐厨	单独市政	单独建筑	单独园林	单独合计	协同优势	
减量化	98.5	97	90.1	92.6	99.8	100	95.9	2.71%	
资源化	64.6	23.8	77.4	0	99.8	80.1	56.2	14.9%	
无害化	碳排放	-194.7	-154.4	-43.5	8.1	1.9	5.8	-181.7	7.15%
	飞灰率	1.2	2.2	0	0.8	0	0	1.5	20%
	炉渣率	10.8	19.98	0	6.7	0	0	13.34	19%

4 结语

本文采用物质流分析方法，对比研究了固体废弃物单独处理系统与多种固体废弃物协同处理系统，揭示了协同处理系统相比单独处理系统的优势，相关主要结论如下：

①通过对城镇生活废弃物协同处理系统进行物质流分析发现，城镇生活废弃物协同处理与城镇生活废弃物单独处理相比在减量化方面拥有一定优势减量化提升了2.7%。

②通过对城镇生活废弃物协同处理系统进行物质流分析发现，城镇生活废弃物协同处理与城镇生活废弃物单独处理相比在资源化方面拥有一定优势资源化指标提升了14.9%，提高了资源的利用率。

③通过对城镇生活废弃物协同处理系统进行物质流分析发现，城镇生活废弃物协同处理与城镇生活废弃物单独处理相比在无害化方面拥有很大优势，碳排放指标提升了7.15%，飞灰率和炉渣率分别下降20%和19%，增强了碳减排效果，同时也减少了飞灰和炉渣的排放。

参考文献

- [1] 许明俊,向赠焯.生活垃圾焚烧发电厂垃圾渗滤液与餐厨废水协同处理设计及应用[J].广东化工,2024,51(09):142-145.
- [2] 刘越,孟海波,沈玉君,等.基于模糊层次分析法的生物燃气产业竞争力评价模型及应用[J].农业工程学报,2016,32(S1):275-283.
- [3] 费凡.城市生物质废物处理系统耦合及技术选择模拟研究[D].北京:清华大学博士学位论文,2019.