



# 城市生活垃圾焚烧处理工艺选择的经济性评价\*

毛永宁<sup>1</sup>, 汪小慈<sup>1</sup>, 赵黛青<sup>1</sup>, 邵振华<sup>1, 2</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**【摘要】** 通过对城市生活垃圾焚烧处理各工艺环节进行具体分析, 结果表明: 垃圾焚烧系统宜采用机械分选预处理技术、热电联产的能源利用方式、半干法+烟气催化+布袋除尘的烟气处理技术及飞灰固化处理技术相结合。在补贴为 140 元/t 的条件下, 从项目投产年算起, 流化床、炉排炉和气化熔融技术投资回收期分别为 4、5、9 a, 等离子体气化焚烧技术在运行年限中不能收回投资。若要推行气化熔融焚烧技术和等离子体气化焚烧技术, 一方面可提高这 2 种技术的垃圾处理补贴, 另一方面也可将其环境效益考虑进技术的综合效益。

**【关键词】** 生活垃圾; 焚烧; 能耗; 飞灰; 评价

中图分类号: X705

文献标识码: A

文章编号: 1005-8206 (2015) 01-0024-04

## Economic Evaluation of Incineration Technique Selection for Municipal Domestic Waste

Mao Yongning<sup>1</sup>, Wang Xiaohan<sup>1</sup>, Zhao Daiqing<sup>1</sup>, Shao Zhenhua<sup>1,2</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong 510640;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**【Abstract】** Each process of municipal domestic waste incineration was analyzed in detail. The results showed that the combination of mechanical separation pretreatment technology, cogeneration way of energy utilization, semi-dry + flue gas catalytic + bag filter technology, and fly ash solidification processing technology was best suited to waste incineration system. If the disposal subsidy is 140 RMB/t, the payback period of fluidized bed technology, grate furnace technology and gasification-melting technology is required to 4 years, 5 years and 9 years, respectively. Plasma gasification technology cannot recoup their investment in the operating life. To implement gasification-melting incineration technology and plasma gasification incineration technology, waste disposal subsidies of 2 technologies should be improved on the one hand, the environmental benefits of 2 technologies in the comprehensive benefits can be taken into account on the other hand.

**【Key words】** domestic waste; incineration; energy consumption; fly ash; evaluation

## 1 评价模块的细分

### 1.1 评价模块

研究过程中, 通过对 MSW 焚烧系统各工艺进行梳理, 将 MSW 焚烧系统分为入炉前的预处理、焚烧、热能利用、烟气处理、飞灰处理 5 个工艺模块, 各工艺模块下又有不同的处理技术。图 1 为城市生活垃圾焚烧系统模块组成, 由此可知, 垃圾焚烧处理系统共有 648 种技术组成模式。通过对各工艺模块下的相关技术进行具体的经济性分析、能流分析, 即可对城市生活垃圾焚烧系统下不同技术组合进行具体评价。

### 1.2 评价前提

参考垃圾焚烧处理工程案例, 设定入炉垃圾热值为 6 000 kJ/kg, 焚烧电厂处理能力为 20 t/h, 年

运行时间为 8 000 h, 垃圾焚烧电厂使用期限为 30 a, 垃圾处理补贴为 140 元/t。按国家发展改革委规定, 焚烧每吨生活垃圾所发电量中, 有 280 kWh 的上网电量可按 0.65 元/kWh 计算<sup>[1]</sup>, 其余按当地同

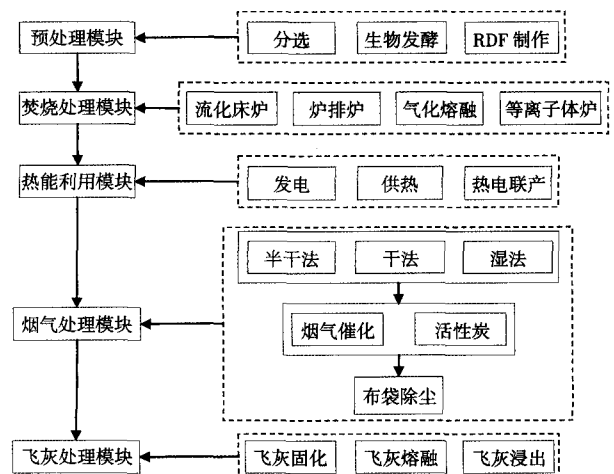


图 1 生活垃圾焚烧系统模块组成

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB201501); NSFC-JST 重大国际合作项目(51161140330)

收稿日期: 2014-08-28

类燃煤机组上网电价计算, 本研究取 0.52 元/kWh (南方火电上网电价), 供热价格参考北京市 2001 年热力出厂价格为 25 元/GJ<sup>[2]</sup>。

## 2 垃圾焚烧处理系统分析

### 2.1 垃圾预处理模块

现阶段, 我国城市生活垃圾的平均含水率超过 50%, 平均低位热值仅有 4 160 kJ/kg, 而按照规定, 进入焚烧炉的燃料低位热值至少需达到 6 000 kJ/kg。因此, 城市生活垃圾入炉焚烧需进行预处理以提升其整体热值。现行的预处理工艺一般有分选、生物发酵和制成垃圾衍生燃料 (RDF) 等方式。分选指通过机械或人工挑选的方式去除垃圾中大部分不可燃成分, 该方法机械和人工劳动强度较大; 采用生物发酵的方法, 一方面可以实现垃圾水分和有机物的减少, 另一方面可改善垃圾特性, 进而提高入炉垃圾的整体热值, 但其处理周期长; RDF 技术指通过对生活垃圾进行破碎和分选, 去除不燃物, 经干燥、脱水、破碎、压缩加工成型为固体燃料, 其易于存储运输、热值高、二次污染低且二恶英排放量少, 但制作 RDF 能耗较大<sup>[3-5]</sup>。各预处理工艺能耗见表 1。

表 1 不同预处理技术下的工艺能耗

技术分类	机械分选/ (kWh/t)	破碎机/ (kWh/t)	压制成型机/ (kWh/t)	抓斗起重机/ (kWh/h)	链板输送机/ (kWh/h)
分选	10.6			130	10
生物发酵				130	10
RDF	10.6	28.3	72.5	130	10

### 2.2 垃圾焚烧模块

目前主流焚烧技术有流化床焚烧技术、机械炉排焚烧技术、气化熔融焚烧技术、等离子体气化焚烧技术。流化床焚烧技术是从炉膛底部布风板鼓入高压空气, 使炉床上铺设的石英砂粒处于沸腾状态, 垃圾入炉后即与炽热的石英砂迅速处于完全混合状态, 气固强烈混合, 垃圾被充分加热、干燥, 进而完全燃烧, 但入炉垃圾需进行破碎处理, 且大量掺入的石英砂会加剧炉体的蚀损、后续需处理的烟尘量大 (为炉排炉的 3~4 倍)<sup>[6]</sup>。机械炉排炉的基本原理是靠炉排的运动使垃圾不断翻动、搅拌并向前或逆向推行。其只需简单预处理入炉垃圾, 运行过程中炉内燃烧工况较为稳定, 飞灰量及炉渣热灼减率均较低。气化熔融技术是指将生活垃圾中的有机成分气化和无机成分熔融相结合, 在充分燃烧垃圾中可燃成分的同时, 熔融焚烧后的无机灰渣, 并回收灰渣中的有价金属、熔融渣可资源化利用的新型处理技术, 该技术可更高效地将生活垃圾资

源、能源化, 同时实现二恶英、呋喃类、重金属等剧毒二次污染物接近零排放。等离子体气化焚烧技术通过高温电弧 (可达 5 500 ℃) 将垃圾中有机成分分解为 CO、H<sub>2</sub> 等可燃成分; 并将无机物完全熔化即冷后形成玻璃体。相对普通焚烧炉而言, 等离子体焚烧技术所需要的气体体积仅为炉排炉的 20% 左右, 因此其尾气处理系统能极大地简化。参考国内相关 MSW 焚烧处理工程, 设定 MSW 焚烧处理工程的基础投资和运行费用组成见表 2<sup>[7-10]</sup>。垃圾焚烧过程中能耗主要由鼓风机产生, 某厂采用炉排炉焚烧系统, 在垃圾热值为 6 000 kJ/kg 时, 过量空气系数为 1.73, 所产烟气体量为 93 800 m<sup>3</sup>/h, 通过风机选型可得出电机功率为 162 kW。而流化床需要高压风机使物料流态化, 其动力消耗是炉排炉的 1.1~1.5 倍; 气化熔融焚烧所需空气过量系数为 1.2~1.4<sup>[11]</sup>; 等离子体焚烧炉处理每吨垃圾功耗为 100~150 kW。据此可分别求得气化熔融和等离子体气化焚烧系统的能耗。

表 2 不同焚烧处理技术的基础投资及运行成本

炉型	流化床	炉排炉	气化熔融	等离子体
日处理能力的基础投资/(万元/t)	30	35	50	108
处理每吨 MSW 运行成本/(元/t)	60	12	180	250

### 2.3 热能利用模块

生活垃圾焚烧过程会释放大量热能, 在热能的利用过程中, 有直接供热、余热发电和热电联产 3 种模式。直接热能利用方式热效率利用最高, 可达 70%, 但面临热输运过程耗散较大且热需求受季节变化影响等问题; 而利用余热发电的模式, 虽可显著提升能效品质, 但相较燃煤发电而言, 垃圾发电效率一般低于 25%; 热电联产方式通过合理的调节热能利用过程, 可获得较高的热能利用效率 (发电效率为 5%~15%, 供热效率为 30%~40%), 综合利用效率可达 50%<sup>[12]</sup>。采用余热发电模式时, 其能耗主要由给水泵和冷却塔能耗组成, 参考相关资料, 可得出发电机组需配备水泵功率为 219 kW; 冷却塔配用风机功率为 140 kW<sup>[13]</sup>。

### 2.4 烟气处理模块

目前, 常用的烟气处理工艺主要由脱酸装置、二恶英处理装置和除尘装置组成。其中脱酸有湿法、半干法和干法 3 种工艺, 三者处理后的污染物剩余率分别为 5%、15%、25%。湿法净化工艺可以满足严格的排放标准, 但流程复杂, 系统投资费用约为半干法工艺的 1.75 倍, 且存在后续的废水处理问题<sup>[14]</sup>; 半干法工艺较成熟、设备简单, 也可以

达到较高的净化效率；干法工艺系统最简单，设备投资仅为半干法工艺的 50%，且不存在污水处理等优势，但其对污染物的净化效率在三者中最低。针对二恶英的处置除了应用广泛的活性炭喷射处理技术外，还有烟气催化分解技术<sup>[15]</sup>。两者比较见表 3。可以看出，活性炭喷射方案一次投资（设备成本）占比显著低于催化分解方案，但其运行成本较高，且需加强企业的监管措施，以防止其在运行过程中偷减活性炭用量或者以次充好来节省成本；而采用烟气分解催化技术可减少监管成本，且无需对飞灰进行二次去毒性处理。此外，国标规定垃圾焚烧中必须采用布袋除尘设备进行烟气除尘作业。

表 3 烟气处理技术比较

分类	一次投资占比/%	运行成本占比/%	监管成本	去毒性处理
活性炭吸附	0.4	7.4~13.9	高	需要
烟气催化分解	1.7~4.2	5 a 更换 1 次催化剂	低	不需要

对于脱酸系统，其能耗主要来自旋转雾化器及大块破碎机，参考相关资料，旋转雾化器的石灰浆喷射量在 1~5 m<sup>3</sup>/h 时，其功耗为 74 kW/h<sup>[16]</sup>；大块破碎机破碎能耗为 22 kW/h<sup>[17]</sup>。而活性炭喷射装置能耗主要由风机产生，若采用罗茨风机额定进气流量为 168 m<sup>3</sup>/h，电机额定功率为 5.5 kW<sup>[18]</sup>。对于布袋除尘器运行过程能耗，装置所含各电机功耗为 61.1 kW。此外，烟气的处理过程一般通过电气化的自动控制完成，控制过程能耗一般由控制电机、低压断路器等设备能耗以及灰输送系统、照明和检修系统能耗组成。单套系统装置总耗电量平均为 100 kW/h。而作为关键设备之一的引风机，以上海江桥生活垃圾焚烧厂为例，该工程采用单台日处理能力为 500 t 的炉排炉，配置引风机额定出力为 117 000 m<sup>3</sup>/h，单台额定功率为 239 kW<sup>[19]</sup>。

### 2.5 飞灰处理模块

生活垃圾焚烧处理后产生的飞灰大约占垃圾质量的 5%<sup>[20]</sup>。现行飞灰无害化处理技术有飞灰固化处理技术、飞灰熔融处理技术、飞灰浸出处理技术等。飞灰固化处理技术指将飞灰掺入水泥（或沥青）制成混凝土块（或沥青块），若掺混比例适当，可有效固化飞灰中重金属物质，实现飞灰的连续批量处理，飞灰固化处理费用较低，但将显著增加固废的密度，且在长期的堆放中仍将有较高的重金属浸出率。飞灰熔融处理是指利用燃料或电将飞灰加热至 1 400 ℃，使其中二恶英熔融分解，在添加剂的作用下将飞灰熔制成性能稳定的玻璃晶体，能实现飞灰的减容减量且处理后基本无重金属浸出，但处

理能耗高。飞灰浸出处理技术指通过酸（碱）提取、生物浸取等方法将飞灰中有毒重金属提取出来，从而达到飞灰的无害化处理，其处理后重金属的再浸出较低，但处理费用较高且难以实现飞灰的批量连续处理。灰渣处理系统能耗由金属回收装置和灰渣无害化处理装置能耗组成。参考相关资料，金属回收系统功耗为 11 kW；当采用流化床和炉排炉焚烧技术时，固化无害化处理装置功耗为 87.2 kW<sup>[21]</sup>，若采用熔融技术处理飞灰等危险物，所耗能量为入炉垃圾热值的 1.9%<sup>[22]</sup>。

## 3 敏感性分析

### 3.1 生活垃圾焚烧处理过程能流分析

生活垃圾焚烧处理过程能流见图 2。以机械分选 + 炉排焚烧技术 + 半干法脱酸 + 活性炭吸附 + 布袋除尘 + 飞灰固化处理为例，通过图 2 可以清楚地得出各工艺的能耗状况，并可得出垃圾焚烧工程实际产出的能量，进而为垃圾焚烧工艺选择的经济性评价提供能源收入数据。



图 2 生活垃圾焚烧处理过程能流

### 3.2 垃圾焚烧技术选择的经济性分析

通过前面的分析可以得知，垃圾焚烧系统宜采用机械分选预处理技术、热电联产的能源利用方式、半干法 + 烟气催化 + 布袋除尘的烟气处理技术、飞灰固化处理技术相结合。据此，可以单独考虑垃圾焚烧处理模块的焚烧技术选择。图 3 为不同焚烧技术的年收益率。流化床、炉排炉、气化熔融与等离子体气化焚烧技术的年收益率分别为 32.9%、23.4%、11.6%与 0.65%；从项目投产年算起，流化床、炉排炉和等离子体气化焚烧技术投资回收期分别为 4、5、9 a，等离子体气化焚烧技术在运行年限中不能收回投资。从趋利性来看，现阶段仍将以流化床焚烧技术和炉排炉焚烧技术为主；若要推行气化熔融焚烧技术和等离子体气化焚烧技术，一方面可提高这些技术下的处理补贴，另一方面也可考虑将不同焚烧技术的污染物排放折算成环境成本，进而可

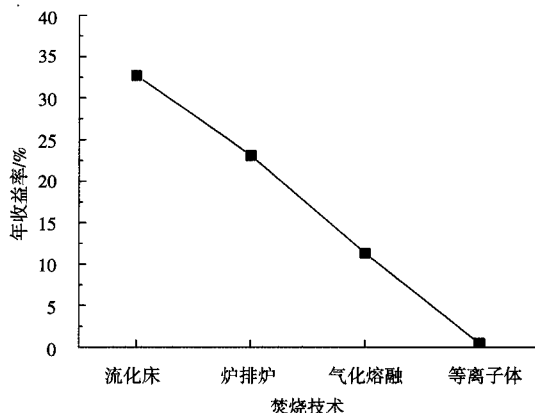


图3 不同焚烧技术的年收益率

对比分析垃圾焚烧工程的经济、环境综合效益。

#### 4 结论

1) 垃圾焚烧系统宜采用机械分选预处理技术、热电联产的能源利用方式、半干法+烟气催化+布袋除尘的烟气处理技术、飞灰固化处理技术相结合。

2) MSW 处理补贴为 140 元/t 时, 从项目投产年算起, 流化床、炉排炉和气化熔融技术投资回收期分别为 4、5、9 a, 等离子体气化焚烧技术在运行年限中不能收回投资。

3) 若要推行气化熔融焚烧技术和等离子体气化焚烧技术, 一方面可提高这 2 种技术的垃圾处理补贴, 另一方面也可将其带来的环境效益折算进对应技术的总体收益以综合评价。

#### 参考文献:

[1] 国家发展改革委. 国家发展改革委关于完善垃圾焚烧发电价格政策的通知[EB/OL].[2012-03-28].[http://www.gov.cn/zwqk/2012-04/10/content\\_2109921.htm](http://www.gov.cn/zwqk/2012-04/10/content_2109921.htm).

[2] 北京市物价局. 关于调整北京市民用供热价格和热电厂热力出厂价格的通知[EB/OL].[2001-10-17].<http://www.bdhg.com.cn/NewsPage.aspx?NewsID=209>.

[3] 李延吉, 张伟, 宋政刚, 等. 高热值垃圾制备 RDF 成型特性及可行性[J]. 可再生能源, 2013, 31(7): 116-119.

[4] 石狮市鸿峰环保生物工程有限公司. 垃圾成品库桥式抓斗起重机[EB/OL].[2012-02-07].[http://wenku.baidu.com/link?url=3\\_TBw18txcg5aXswsd-UcaL4bd5ArRv822Mkc3agXl6IciPNHmtC3xuBDw4036D29F0tkWeFZH023IWmAyotCQjD000TUjbCdbKW DzxjNO](http://wenku.baidu.com/link?url=3_TBw18txcg5aXswsd-UcaL4bd5ArRv822Mkc3agXl6IciPNHmtC3xuBDw4036D29F0tkWeFZH023IWmAyotCQjD000TUjbCdbKW DzxjNO).

[5] 大连典石精密机械有限公司垃圾链板输送机[EB/OL].[2013-12-04].<http://b2b.hc360.com/supplyself/126539276.html>.

[6] 暴雅娴, 贾彦武, 饶汉东, 等. 生活垃圾焚烧发电厂设计探讨[J]. 环境工程, 2012, 30(6): 98-100.

[7] 沈解忠, 王政. 循环流化床垃圾焚烧技术特点及优势之探讨[J]. 江苏锅炉, 2010(2): 7-11.

[8] 中国火力发电网. 浙江丽水生活垃圾焚烧电厂投产[EB/OL].[2011-11-22].<http://www.hlfed.com/a/xingyekuaixun/xiangmu-jianshe/20120301/1789.html>.

[9] 中国环境报. 上海固处中心引入等离子体气化设备[EB/OL].[2014-01-22].[http://www.cenews.com.cn/js/gfcl/201401/t2014012\\_2\\_764029.html](http://www.cenews.com.cn/js/gfcl/201401/t2014012_2_764029.html).

[10] 龙吉生, 徐文龙. 城市生活垃圾处理技术的国际发展趋势[EB/OL].[2007-07-07].[http://www.cn-hw.net/html/sort054/200707/3066\\_3.html](http://www.cn-hw.net/html/sort054/200707/3066_3.html).

[11] 李水清, 姚强, 李润东, 等. 城市垃圾气化熔融工艺的理论计算和技术分析[J]. 动力工程, 2004, 24(1): 125-131.

[12] 肖刚. 城市垃圾流化床气化与旋风燃烧熔融特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

[13] 江苏省环境科学研究院. 南京市江北静脉产业园生活垃圾焚烧发电厂项目环境影响评价[EB/OL].[2012-11].<http://www.docin.com/p-688561181.html>.

[14] 闫志海. 垃圾焚烧发电厂烟气处理方案的选择[J]. 天津科技, 2008(5): 56-58.

[15] 耿静, 吕永龙, 贺桂珍, 等. 垃圾焚烧发电厂二恶英控制方案的技术经济分析[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(1): 75-80.

[16] 广州李坑生活垃圾焚烧发电厂. 烟气净化系统运行规程[EB/OL].[2011-09-23].<http://wenku.baidu.com/link?url=7pouv12qtzsq7BbJB1YRvduaOLMKpzc8Dy6jwLuyKiBGxbirmXm02QTNqOZQ8uFusyTUcIFkqhrYcbyIjxKw4eOTuWCFw2Do-H1B4fQvy>.

[17] 保定伟业塑胶机械厂. 大块料破碎机[EB/OL].[2013-12-04].[http://www.suliaojixie6.com/product\\_view\\_23033.html](http://www.suliaojixie6.com/product_view_23033.html).

[18] 广州市珑基机械设备有限公司. 垃圾焚烧发电厂活性炭喷射系统主机—罗茨风机[EB/OL].[2013-12-04].<http://detail.1688.com/offer/1211093828.html>.

[19] 李军, 陈竹, 王占磊. 生活垃圾焚烧厂引风机选用方案的比较[J]. 环境卫生工程, 2011, 19(5): 21-22.

[20] 郑丽婷, 刘阳生. 从垃圾焚烧飞灰中回收金属研究进展[J]. 环境工程, 2008, 26(S1): 343-345.

[21] 北京国电华北电力工程有限公司. 高安屯垃圾焚烧电厂初步设计报告修改稿[EB/OL].[2011-10-08].<http://www.docin.com/p-269510996.html>.

[22] 李润东, 池涌, 李水清, 等. 城市垃圾气化熔融处理技术探讨[J]. 电站系统工程, 2002, 18(2): 45-48.

作者简介: 毛永宁(1986—), 研究助理, 硕士, 从事能源开发的技术经济评价。

E-mail: wangxh@ms.giec.ac.cn.