

# 流化床中垃圾与煤混烧的技术经济分析

田文栋<sup>1</sup> 金关麟<sup>2</sup> 魏小林<sup>1</sup> 黎 军<sup>1</sup> 盛宏至<sup>1</sup>

( 1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 嘉兴热电厂, 浙江 嘉兴 314000 )

**摘 要** 本文对城市生活垃圾在流化床中与煤的混烧技术进行了分析; 根据垃圾热值, 讨论了低热值垃圾焚烧中添加煤混烧的必要性; 给出了垃圾处置收费和售电价格对于混烧电厂的经济影响。结果表明: 对于所给定焚烧项目的垃圾来讲, 其垃圾的低位热值近似为 4200 kJ/kg, 需要进行混烧, 其中煤的比例应小于 10~20%; 垃圾量的提高, 垃圾收费带来的收益大; 而垃圾热值的提高, 售电价格带来的收益大。增加垃圾收费补贴可鼓励焚烧厂焚烧更多的垃圾。

**关键词** 城市固体废弃物; 混烧; 流化床; 电力; 分析

**中图分类号:** O359 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2002)Suppl.-0225-04

## ANALYSIS OF CO-COMBUSTION UTILIZATION TECHNOLOGY AND ECONOMY OF COAL WITH MUNICIPAL SOLID WASTE IN FBC

TIAN Wen-Dong<sup>1</sup> JIN Guan-Lin<sup>2</sup> WEI Xiao-Lin<sup>1</sup> LI Jun<sup>1</sup> SHENG Hong-Zhi<sup>1</sup>

(1. Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China;

2. JiaXing Heat and Power Factory, JiaXing, Zhejiang 31400, China)

**Abstract** In this paper, the co-combustion technology of municipal solid waste with coal in FBC was analyzed. The co-combustion is necessary for waste due to its low heat value. Economical influences of waste fee and electrical price on waste co-combustion plants were analyzed. The results indicate that for the waste studied in the incineration object, co-combustion technology is necessary since the heat value of waste is 4200 kJ/kg, and the coal ratio in mixed fuel should be less than 10%~20%. Increasing handling output of waste, incineration plants benefit more from waste fee than from electrical price. While increasing heat value of waste, incineration plants benefit more from electrical price than waste fee. Increase of waste handling allowance may encourage much more waste to be incinerated.

**Key words** municipal solid waste; co-combustion; fluidized bed; electric power; analysis

## 1 前 言

随着我国近年来经济的高速发展和人民生活水平的提高, 城市生活垃圾逐年递增, 特别是经济发展较快的东部地区, 由于人口密集, 用地紧张, 城市生活垃圾不仅严重污染了环境, 危害了人身健康, 而且进一步制约了经济的发展<sup>[1,2]</sup>。目前城市生活垃圾无害化处置的手段主要有填埋、堆肥和焚烧<sup>[3-5]</sup>, 实际上这三种方式是互补的, 各有优势。堆肥的残余物需要焚烧和填埋, 而焚烧的残余灰渣需要填埋, 最佳的方式是城市生活垃圾综合利用处理, 通过垃圾分类或采用机械化分拣, 将城市生活垃圾分成可

堆肥的生物质类、可焚烧发电的塑料类、必须填埋的灰渣类以及可再利用的物资类等, 然后分别处理, 以实现城市生活垃圾的无害化、减量化和资源化。但是, 我国大型城市多处于人多地少的东部地区, 由于各种条件所限, 采用焚烧处置城市生活垃圾是一种较好的选择。

城市生活垃圾焚烧系统的建设需要大量资金投入, 热能的利用是回收投资的主要途径。热能的利用主要通过供热和发电实现, 当合理供热范围内的热用户的热能需求小于焚烧提供的能量时, 或热用户的需求变化较大时, 将主要以发电实现城市生活垃圾中热能的回收利用。

收稿日期: 2002-01-28; 修订日期: 2002-04-19

基金项目: 国家重点基础研究发展项目 (No.G1999022101); 国家自然科学基金项目 (No.59776023); 中国科学院重点项目资助 (No.KY95T-03-02)

作者简介: 田文栋 (1969-), 男, 河北辛集人, 助研, 硕士, 现在中国科学院工程热物理所工作, 主要从事燃烧和流化床的研究。

在我国东部沿海地区,在八十年代末和九十年代初由于经济的快速发展的需要,曾经修建了大量小型热电厂(10 MW左右)。近年来,随着工业以及电力结构的调整和小型热电厂不易解决的效率低下、污染严重和经济性差等问题,小型热电厂需要关闭或转产,而企业和职工将面临严峻的经济形势。另一方面,国家鼓励采用城市生活垃圾等废弃物焚烧发电,并给予一定的优惠政策。由于城市生活垃圾热值低下,燃烧后可利用的热量很小,以12 MW小型热电厂的发电能力,可以满足每天处理1000吨品质较好的城市生活垃圾(1百万人产生垃圾的量)的发电需求。而小型热电厂拥有场地、发变电设备、软化水与冷凝水的条件、锅炉与汽机的运行能力,而且厂址一般处于城市边缘,在城市生活垃圾运输和热量利用的合理半径之内。因此,将小型热电厂改造为城市生活垃圾与煤混烧发电的机组将是一种选择,原有的小型热电厂经过改造后可以成为大型的垃圾焚烧发电厂,此时可以综合考虑环境保护的要求,通过安装比较完善的尾气处理装置,以满足严格的焚烧炉排放标准。

单纯焚烧城市生活垃圾在我国尚处于研究开发阶段<sup>[6-8]</sup>,需进一步改进并大型化。煤与城市生活垃圾混烧发电与纯城市生活垃圾焚烧相比,能保证燃烧稳定,提高发电效率,有利于投资回收,缩短投资的回收期。

城市生活垃圾在储运处置过程中,会产生各种二次污染,焚烧也不例外。这主要在于垃圾本身含有多种有害成分,而燃烧过程中的不稳定一定会造成污染物分解氧化的不彻底。垃圾是一种混合物,本身具有波动大的特点,就需要在焚烧过程中尽量保持稳定的燃烧温度,同时加强二次污染物脱除的设备和措施。流化床技术的较大规模研究与应用已有几十年的历史,主要特点是燃料适应性好、燃烧效率高,可采用几乎任何含碳燃料,另外,流化床属低温燃烧,床温在800~900°C,NO<sub>x</sub>排放量低,通过

添加石灰石,可实现床内脱硫,保证较低的SO<sub>2</sub>排放。而对于热值低、水分高、成分复杂、性状不一的城市生活垃圾的焚烧,流化床更具有迅速混合、燃烧效率高且部分污染物排放量小的特点。

据不同的气流速度流化床可分为鼓泡流化床和循环流化床等。在垃圾焚烧中鼓泡床及其类似形式的流化床已有较大规模的应用,技术较为成熟<sup>[9,10]</sup>。目前循环流化床垃圾焚烧技术在实际中也得到了广泛的应用,该技术可使燃料迅速地在床内均匀扩散,特别适合于尺寸不一、形状各异的垃圾的燃烧,充分发挥了流化床燃料适应性好的优点。循环流化床不但可用来烧煤,还可用来焚烧垃圾,或采用煤和垃圾混烧的方式发电,是一种有着相当研究和开发潜力的流化床技术。我国正在积极开发煤与城市生活垃圾在流化床中的混烧利用技术<sup>[7]</sup>,但实际运行的混烧炉很少;国外采用混烧技术的焚烧厂很多,并有一些研究结果<sup>[11]</sup>,因此本文从技术经济的角度出发,分析煤与城市生活垃圾混烧利用的一个例子。

## 2 焚烧系统采用的燃料特性

为城市生活垃圾焚烧建设项目提供垃圾的区域内人口约40多万(日产垃圾500吨),该区域内城市生活垃圾主要按五个区清运,根据建设项目所在地环境卫生管理处提供的各区垃圾的清运量和物理化学成分,加权平均得到当地固体废弃物的基础数据。具体数据见表1和表2。

从表1、2中可以看出:所焚烧的城市生活垃圾水分含量非常高(56%);灰分含量较高(22%);固定碳含量低(12%);热值低(4200 kJ/kg)。由于所焚烧的固体废弃物品质低下,采用煤进行助燃。表3给出了设计用煤的成分分析。

## 3 城市生活垃圾与煤混烧的必要性

图1给出了不同热值的城市生活垃圾的绝热燃

表1 固体废弃物的化学成分分析(应用基)

氢(%)	氧(%)	氮(%)	硫(%)	氯(%)	固定碳(%)	灰分(%)	水分(%)	低位热值(kJ/kg)	高位热值(kJ/kg)
1.75	6.99	0.57	0.04	0.26	12.24	21.85	56.3	4200	5600

表2 固体废弃物的物理组成特性及热值分析(应用基)

金属(%)	玻璃(%)	纸张(%)	塑料(%)	竹木(%)	布类(%)	厨余(%)	果类(%)	灰分(%)
0.05	1.07	4.96	14.63	0.84	3.79	69.45	3.59	1.61

表3 燃料煤的组成特性(应用基)

低位热值(kJ/kg)	高位热值(kJ/kg)	挥发分(%)	固定炭(%)	水分(%)	灰分(%)	氢(%)	氧(%)	氮(%)	硫(%)	氯(%)
22358	23131	18.5	59.7	4.9	26.8	2.9	2.8	1.0	1.9	0.01

烧温度。垃圾的热值和化学成分为测试值, 利用垃圾的化学成分计算了在绝热状态下的燃烧温度, 计算中采取的过量空气系数为 1.4, 空气预热温度 200°C, 垃圾初始温度 20°C, 灰渣平均的热容 1.5 kJ/kg·K。由于需要不同热值城市生活垃圾进行计算, 所选用的垃圾并非建设项目所在地的垃圾, 而是包括了不同地区的垃圾数值。低热值垃圾的特点是水分和灰份含量很高, 因此计算值规律性较好, 高热值垃圾的成分复杂, 参数相差较大, 计算的绝热燃烧温度波动较大。

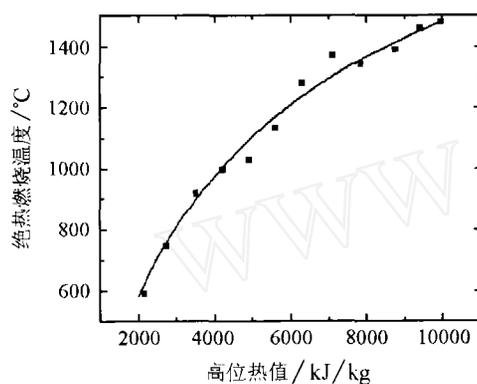


图 1 不同热值城市生活垃圾的绝热燃烧温度

由图 1 可知, 在城市生活垃圾高位热值比较低 ( $< 4000$  kJ/kg) 时, 垃圾的绝热燃烧温度低于 900°C, 当垃圾高位热值超过 5000 kJ/kg 后, 绝热燃烧温度才超过 1000°C。但在燃烧过程中, 反应产物生到最高温度之前, 气体不完全燃烧热损失、固体不完全燃烧热损失、散热损失和灰渣物理热损失已经损失了部分能量。一般垃圾焚烧炉的燃烧效率不足 90%, 因此, 垃圾燃烧后的最高温度与绝热燃烧温度存在上百度的差距。可见单独焚烧低位热值为 4200 kJ/kg, 高位热值为 5600 kJ/kg 的城市生活垃圾虽然理论的燃烧温度可以高于 900°C, 但由于垃圾热值随来源、季节等因素大幅度波动, 因此在没有辅助燃料时燃烧不够稳定, 难于控制有害气体的生成与排放, 很容易造成环境污染。为了保证燃烧的稳定性, 当城市生活垃圾热值波动时, 需要采用辅助燃油调节燃烧状况, 这无疑增加运行成本。

根据目前低位热值为 4200 kJ/kg 的具体情况, 采用与煤混烧的方案, 进入燃烧器中的燃料为煤与城市生活垃圾的混合燃料, 其低位热值高于 6000 kJ/kg, 可以保证燃烧稳定, 这样可以简化燃烧系统的设计和运行。当焚烧系统建成运行后, 随城市生活垃圾热值的逐年增长, 可以逐渐减少煤的用量, 以保证

在较长时间内垃圾处理能力不会下降, 保证进入焚烧系统总的能量基本稳定, 保证锅炉向汽机输送蒸汽的品质和数量以及汽机工作的基本稳定。加入的少量劣质煤不但提高了炉内的燃烧温度, 提高了燃烧的稳定性和排放。由于煤中的灰份和 S 含量高, 相对于用油助燃来讲, 增加了烟尘的总量和 SO<sub>2</sub> 的排放, 给尾气处置增加了很大难度。但可以部分降低 HCl 的原始排放浓度。

为了达到良好焚烧效果, 目前混合燃料中的煤量占燃料总重量的 10%~20%, 煤产生的热量占燃料总热量的 30%~50%。随城市生活垃圾热值的增长, 混合燃料中的煤量百分比可逐渐减少, 当垃圾低位热值增长到 6000 kJ/kg 以上时, 就可单纯焚烧垃圾, 不再采用与煤混烧的方式。

#### 4 城市生活垃圾与煤混烧的经济性

焚烧单位质量垃圾所释放的热量相当于煤的 1/5 左右, 以相同的蒸汽量计算, 焚烧垃圾的设备比燃煤设备要庞大, 并且为了稳定控制垃圾焚烧过程, 垃圾焚烧炉比一般燃烧器复杂; 为了减少垃圾焚烧产生的二次污染问题, 需要庞大的尾气净化设备, 这些设备的投资和运行成本已经高于垃圾焚烧系统的主要部件焚烧炉。因此按每千瓦发电设备的投资额计算, 全部国产的垃圾混烧电厂的投资已经达到 8000 元/千瓦~10000 元/千瓦, 而引进设备更是达到 20000 元/千瓦, 若以和燃煤电厂相同的价格出售电力, 垃圾焚烧发电厂不仅不可能回收投资, 而且需要大量政府拨款。

垃圾焚烧发电厂的经济收益主要来源于国家政策, 可以体现在两个方面: 优惠电价和垃圾收费。图 2 给出了在垃圾品质变化和质量增加时, 不同优惠电价和垃圾收费情况下的焚烧厂收益。图中给出的收费情况是按售电价格 0.2 元/度计算的, 售电情况按不收取垃圾处置费计算。焚烧发电系统的汽机装机容量为 12 MW; 目前的垃圾处理量为 500 吨/日 (低位 4200 kJ/kg), 根据垃圾数量和热值变动, 在不供热的前提下, 添加煤小于 100 吨/日; 随着热值和处理量的提高, 逐步减少用煤量; 整个系统的自用电为 20%, 每 kW 设备投资额 9000 元。垃圾焚烧电厂的主要支出包括原材料 (水、煤、石灰等)、人工、设备的维护和更新、设备折旧 (厂房 20 年, 设备 15 年)、贷款利率。

如图 2 所示, 随着垃圾处理量的提高, 垃圾带

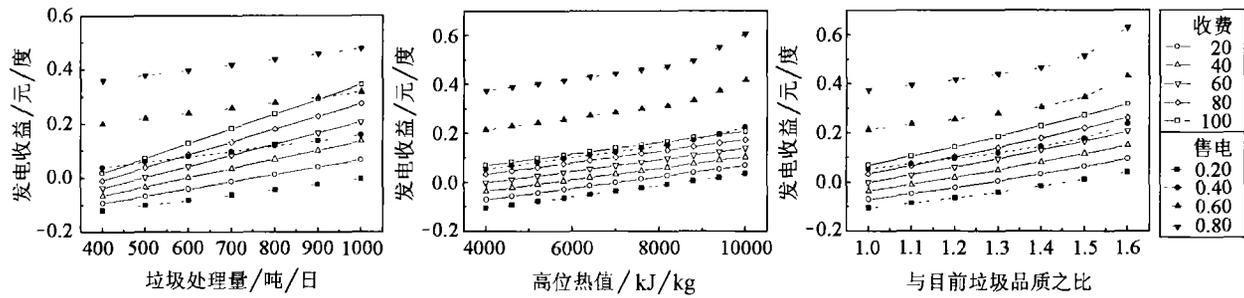


图2 垃圾参数变动带来的焚烧厂收益的变化

入系统的热量增加,需要的煤量减少,降低了垃圾处理的成本,发电厂的效益有所提高,垃圾收费带来效益越来越明显,增加上网电价,易提高焚烧厂收益;随着垃圾热值的提高,垃圾收费和优惠电价收益的增加幅度一致,同样增加上网电价,易提高焚烧厂收益;人民生活水平的提高导致垃圾数量和热值的同步增长,以目前垃圾为标准,在垃圾热值和数量同时增长的情况下,图2(c)给出了焚烧厂的收益,上网电价的影响与图2(b)相同,垃圾收费的影响介于图2(a)与图2(b)之间。优惠电价将垃圾的处置费用转嫁到国家和电用户身上,而且焚烧过程中添加煤的比例过大也会使垃圾焚烧发电厂获得过多的额外收入,对于纯垃圾焚烧发电厂不公平;垃圾收费,需要污染的产生者支付一定的垃圾处置费用,这是合情合理的,但需要国家和地方政府共同制定法律法规,规范环境污染和治理的责任义务,这对于各地来讲,可能需要一定的时间才能形成规范。垃圾焚烧发电事业要发展,需要国家从以上两个方面给予支持,针对不同的地区,可能采用不同的方式。

## 5 结论

在目前中国大部分地区的城市生活垃圾热值普遍偏低的前提下,采用煤和垃圾混烧发电的方案,可以解决垃圾对环境的污染,利用国家对垃圾发电的优惠政策和地区垃圾处置收费政策的支持,可以在较短时间内回收垃圾焚烧系统的建设投资。

在垃圾焚烧系统中,加入的少量煤混烧,可以提高炉内的燃烧温度,提高了燃烧的稳定性和燃烧效率,从而可以降低CO的排放浓度,有利于有害有机物的分解并防止二噁英类物质的生成和排放。但增加了飞灰、SO<sub>2</sub>等的排放。

## 参 考 文 献

- [1] 张坤民, 孙荣庆. 中国环境污染治理投资现状与发展趋势分析. 中国环境科学, 1999, 19(2): 97-101
- [2] 施阳. 北京市垃圾问题的现状及对策. 环境科学研究, 1998, 11(3): 40-41
- [3] 江淑琴, 矫维红. 城市生活垃圾的燃烧性能研究. 工程热物理学报, 1998, 19(5): 647-651
- [4] 钟振洋, 周启祥. 垃圾卫生填埋技术. 城市环境与城市生态, 1999, 12(2): 45-49
- [5] 冯明谦, 刘德明. 滚筒式高温堆肥中微生物种类数量的研究. 中国环境科学, 1999, 19(6): 490-492
- [6] 杨振良, 方建华, 曹俊斌等. 垃圾焚烧炉的设计原则及应用. 见: 中国工程热物理学会燃烧学学术会议论文集. 合肥, 1998. II.63-68
- [7] 蒋旭光, 池涌, 李晓东等. 生活垃圾/煤混烧流化床焚烧试验研究. 见: 中国工程热物理学会燃烧学学术会议论文集. 北京, 1998. III.1-6
- [8] 田文栋, 魏小林, 盛宏至. 内旋流流化床垃圾焚烧炉及其研究中的测量技术. 燃烧科学与技术, 1999, 5(2): 152-159
- [9] Basu P, Fraser S A. 循环流化床锅炉的设计与运行. 岑可法等译. 北京: 科学出版社, 1994
- [10] Anthony E J. Fluidized Bed Combustion of Alternative Solid Fuels; Status, Successes and Problems of the Technology. Progress in Energy and Combustion Science, 1995, 21: 239-268
- [11] Norton G A, Levine A D. Cocombustion of Refuse-Derived Fuel and Coal. Environmental Science and Technology, 1989, 23(7): 774-783