

# 垃圾在流化床中燃烧的特性

姜凡, 潘忠刚, 张立斌, 方建华, 矫维红, 杨波(中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

**摘要:** 在一台特别设计的小型流化床燃烧实验台上对垃圾可燃物代表组分进行实验研究. 结果表明, 干燥的垃圾在床温仅为 500 °C 就能在很短的时间内迅速燃烧, 产生明亮的火焰. 在本实验条件下, 床温没有因为实验组分的加入而下降, 而是随着垃圾的迅速燃烧而急剧升温, 床温提高 30 ~ 70 °C 不等. 垃圾在流化床中燃烧受多种因素的影响, 并讨论了当物料形状(整或碎)、含水量、实验风量(从 5.5 m<sup>3</sup>/h 到 7.5 m<sup>3</sup>/h) 等因素变化后对于燃烧气体成分及炉内温度的影响. 在本实验条件下, 当物料剪碎后会引引起炉内温度水平明显提高, 并使得 CO 排放量略有下降. 物料含水量增加时会导致炉内温度水平明显下降. 实验风量提高时, CO 排放量明显减少.

**关键词:** 城市固体废弃物; 燃烧特性; 流化床

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2001)01-05-0062

## Combustion Characteristics of Municipal Solid Waste in Fluidized Bed

Jiang Fan, Pan Zhonggang, Zhang Libin, Fang Jianhua, Jiao Weihong, Yang Bo(Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** For the experimental investigation on the combustion characteristics of Municipal Solid Waste (MSW) in Fluidized Bed, a lab scale Fluidized Bed facility was constructed. Single and mixed municipal solid waste burning in Fluidized Bed showed that dry waste can be burnt quickly at the bed temperature of 500 °C, and furnace temperature increased about 30 ~ 50 °C. Many kinds of combustion runs were conducted in this Fluidized Bed combustion facility. The parameters examined were air flow rate (from 5.5 m<sup>3</sup>/h to 7.5 m<sup>3</sup>/h), form of fuels (scrap or whole), moisture content and so on. Concentration of CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> in the flue gas were monitored and recorded every 5 seconds. The temperatures along the reactor were recorded every 10 seconds.

**Keywords:** municipal solid waste; combustion characteristic; fluidized bed

焚烧处理城市生活垃圾可达到无害化、减量化和资源化的效果, 是解决城市生活垃圾问题的有效途径之一<sup>[1]</sup>. 由于城市生活垃圾的组成和特性随季节和地域变化极大, 我国城市垃圾的热值一般又较低, 需要对垃圾焚烧炉的选型给予特别的关注. 很多研究工作者认为流化床燃烧方式能够较好地适应我国城市垃圾的特点, 为了给设计和运行提供依据, 对垃圾在流化床里的基本燃烧特性的测定研究非常重要.

### 1 实验设备及仪器

实验台由气源及加热系统、流化床燃烧反应室和检测系统 3 部分组成, 系统结构简图见图 1.

气源及加热系统的主要作用是流化床燃烧反应室提供流量稳定、成分可以控制、温度可调的工作气体. 在本研究中, 所用的工作气体就是空气. 通过用可控硅温度控制仪控制的加热炉, 把进入燃烧反应室的空气温度升高到设定的 800 ~ 1000 °C.

流化床燃烧反应室由内径为 92 mm 的圆柱形反应段和上部空间扩大的缓冲段组成. 在圆柱反应段里填充了高度 100 mm、粒径为 0.9 ~ 2 mm 的空心氧化铝小球, 组成一个高温惰性

基金项目: 国家“九五”重点科技攻关项目(96-A19-05-01-01); 中国科学院应用与发展重大项目(KY95T-03)

作者简介: 姜凡(1972~), 女, 博士生, 主要从事炉内流动、燃烧与传热, 固体废弃物处理, 气、固两相流等方面的研究.

收稿日期: 2000-03-10

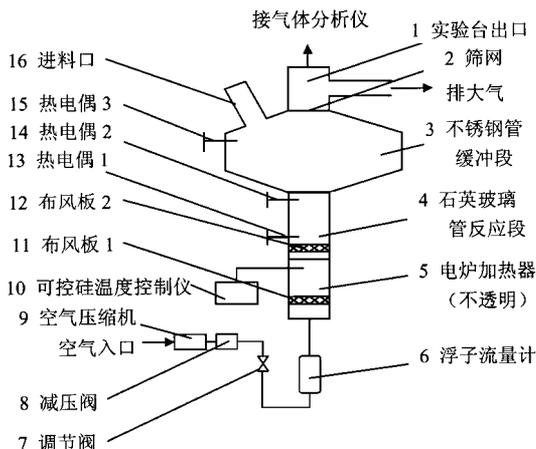


图 1 小型流化床燃烧实验台结构简图

物料流化床.待测定的垃圾组分由上部进料口送入,与气源系统提供的高温气体在流化床内发生反应.为便于观察被测定组分进入流化床内的状态变化和反应过程,反应段采用透明石英玻璃管制造.

检测系统由温度采集记录系统和气体分析仪组成.3支测温热电偶所布置的位置也示于图1.HP-3421A温度采集系统每隔10s采集3只热电偶的毫伏值,通过HP-75袖珍计算机和HP8621A微型打印机记录.在反应室出口抽取一定的气体流量送到Thermo Environmental气体分析仪里进行CO、CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>含量的连续测定,分析结果每5s输出一组.

## 2 实验测定

### 2.1 实验方法

向反应段通入适当流量的高温空气,可以使其中的氧化铝小球维持在一个良好的流化状态,这就为研究和测定垃圾组分在流化床里的基本燃烧特性提供了适宜的环境.在这一环境的各个参数稳定后,从进料口投入待测的垃圾代表组分,观察它们的燃烧现象和伴随着的温度升高和反应器内气体成分的变化.根据记录下来的温度和气体成分随时间的变化关系,可以对这些组分的燃烧特性进行测定和分析.由于散热损失较大,目前石英管反应段内的温度最高只可以控制在500℃左右.

### 2.2 待测物料准备

本研究对垃圾可燃物的典型组分,即塑料、废纸、厨余、棉织物、废木材、橡胶进行实验.为了实验结果有较好的重复性,在本实验中分别采用了干净的整块塑料、卫生纸、圆白菜叶子、棉布、木筷和家用橡胶手套,剪至5~7cm长或见方(家用橡胶手套剪成4~5mm见方),作为前述组分的代表物.有的还要在110℃下烘干2h.在进行单一组分的实验研究时,各种代表物的加料量取为2.7g;混合组分的燃烧试样目前还仅选取了3种,即塑料和卫生纸、厨余和棉布,以及木筷和橡胶,各种组分都只取1.35g,作为代表物进行实验观察.

### 2.3 实验条件

如无特殊说明,所有实验均是在稳定空气流量为6.5m<sup>3</sup>/h,电炉出口温度设为900℃条件下进行,此时,石英管反应器内温度约为500℃.

### 2.4 温度和气体成分变化历程<sup>[2-5]</sup>

#### 2.4.1 6种垃圾的典型代表物的流化床燃烧实验结果

由图2、图3可知:塑料燃料CO<sub>2</sub>峰所包围的面积最大,这与6种物质中塑料的C元素含量相对较高一致.由SO<sub>2</sub>-t曲线图可见橡胶产生的SO<sub>2</sub>量远高于其他物质燃烧所产生的量,说明橡胶是垃圾燃烧产生SO<sub>2</sub>的主要来源.橡胶和厨余在反应中CO排放量最高,说明它们受热后挥发分析出并燃烧迅速,而所提供的空气量明显低于物质挥发分短时间内剧烈燃烧所需空气量,物料中大多数碳及挥发分处于不完全燃烧状态,所以CO量高.一般说来,NO<sub>x</sub>生成的根本条件是高温、富氧和高温区停留时间,它主要来源于2方面,即大气中的氮和燃料中的氮.大气中的氮被氧化成NO<sub>x</sub>在温度高于1540℃时才变得显著,所以在这一实验中只占极少的份额.当燃烧刚开始时,由于炉内温度较低,NO<sub>x</sub>生成较慢,随着燃烧的迅速进行,炉内温度明显升高;当温度达到最高时,CO排放量也达到最大,这种还原性气氛使NO<sub>x</sub>排放并未达到最高.而是在温度略有下降,CO排放量大

幅度减少时才出现.棉布、厨余的  $\text{NO}_x$  排放量高于其他物质.

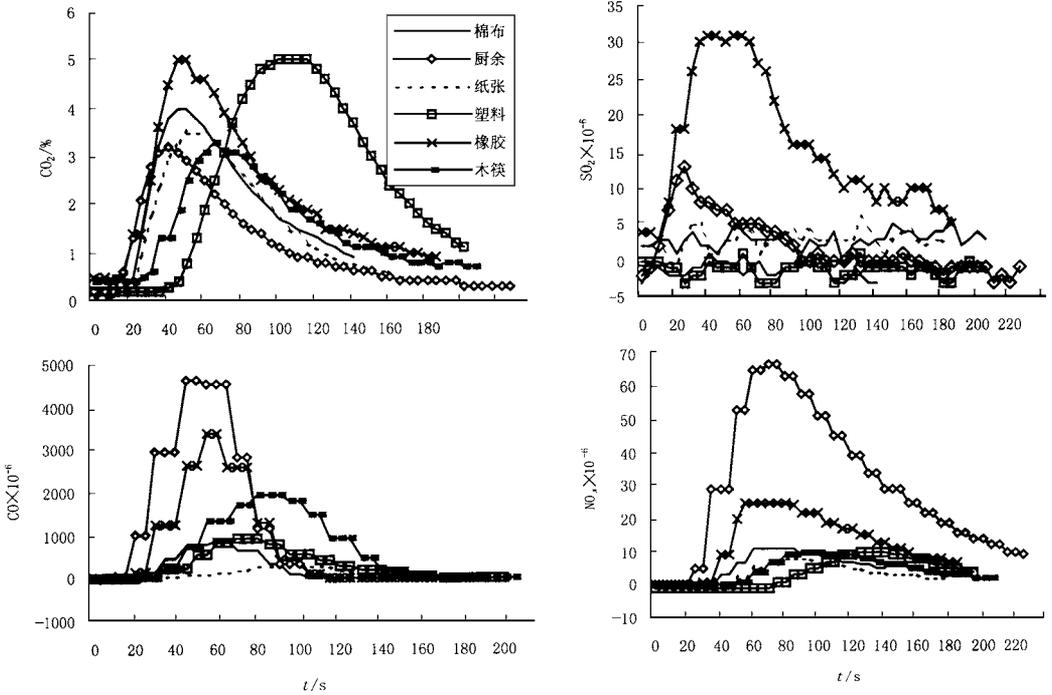


图2 垃圾单一组分典型代表物在流化床内燃烧过程中产生烟气的分析结果

一般来说,在本实验条件下,床温没有因为实验组分的加入而下降,而是随着垃圾的迅速燃烧而急剧升温,床温提高  $30 \sim 70^\circ\text{C}$  不等.塑料、木篾、橡胶在反应过程中  $T_1$  升温最多,说明它们燃烧多集中于床层内部,燃烧放热使床内温度提高很快.橡胶燃料所引起的炉内  $T_2$ 、 $T_3$  升温很多.这主要是由于橡胶燃烧火焰长,因此炉膛中、上部温度都提高很快,在瞬时,出现了  $T_2$  高于  $T_1$  的情况.

#### 2.4.2 物料形状变化的影响

垃圾的形状不同,在流化床中燃烧状况也可能会有所不同.这里以橡胶为例进行说明,其中垃圾组分碎片指的是将橡胶剪碎至  $10 \sim 20\text{mm}$ ,在其他实验条件都相同的条件下与整块橡胶的实验结果进行对比,部分实验结果见图4.

碎物料比较容易在流化床里分散开来,甚至被吹到床层上面,物质与空气接触更加充分,因此  $\text{CO}$  含量略有下降.

物料形状变化对于反应器内燃烧温度的影响较为明显.当物料剪碎后,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  基本上

都明显上升.有些碎的物料还未完全抵达床内就已经燃烧,整个燃烧过程进行得很快、很剧烈,使得反应器内温度很快升高.

#### 2.4.3 水分含量对于实验结果的影响

为研究方便,实验采用圆白菜叶子作为垃圾的一种组分,厨余的代表物,以在烘箱中烘干时间的不同,代表不同含水量的垃圾.

实验按2种方式进行.一是“相同可燃物含量”的厨余燃烧实验,即投入的干燥厨余质量均为  $2.7\text{g}$ ,4种试样分别为:干燥的圆白菜叶  $2.7\text{g}$ ,水分含量为  $89.4\%$  的圆白菜叶  $25.47\text{g}$ ,水分含量为  $83\%$  的圆白菜叶  $15.66\text{g}$ ,和水分含量  $49\%$  的圆白菜叶  $5.3\text{g}$ .这一组实验的部分结果表示在图5里.第2种是“等量物质不同含水量”的厨余燃烧实验,在这组实验里,投入的厨余(圆白菜叶,包括水分在内)总量一律为  $2.7\text{g}$ ,3种试样的含水量分别是  $0\%$ (干燥的)、 $49\%$ ,及  $89.4\%$ .

对于相同可燃物含量的一组实验,可以观察到水分的存在使得流化床温度有不同程度

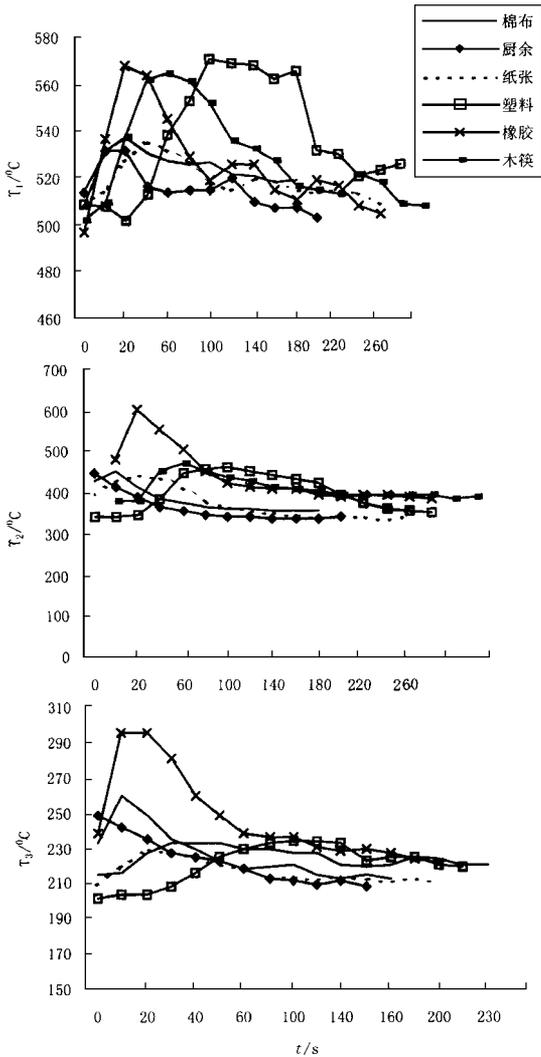


图 3 垃圾单一组分典型代表物在流化床内燃烧过程中温度随时间的变化

的下降,水分越高床温开始下降得也越多.干燥的厨余放入炉内没有出现床温下降的情况,而是迅速燃烧,引起炉温急剧升高.尤其  $T_2$  温度升高很多,可以从大约  $320\text{ }^\circ\text{C}$  升高到  $450\text{ }^\circ\text{C}$  左右;含水  $49\%$  的厨余进入炉内后床温先降低大约  $7\text{ }^\circ\text{C}$  左右,而后随着厨余水分的挥发及可燃物燃烧,床温升高,但  $T_2$ 、 $T_3$  都没有干燥厨余燃烧引起的炉温升高得那么多;水分再增加,床温迅速下降的幅度就越大(例如,水分含量为  $89.4\%$  的试样投入反应器后的床温可以从  $500\text{ }^\circ\text{C}$  下降到  $417\text{ }^\circ\text{C}$ ),随后温度开始缓慢回升

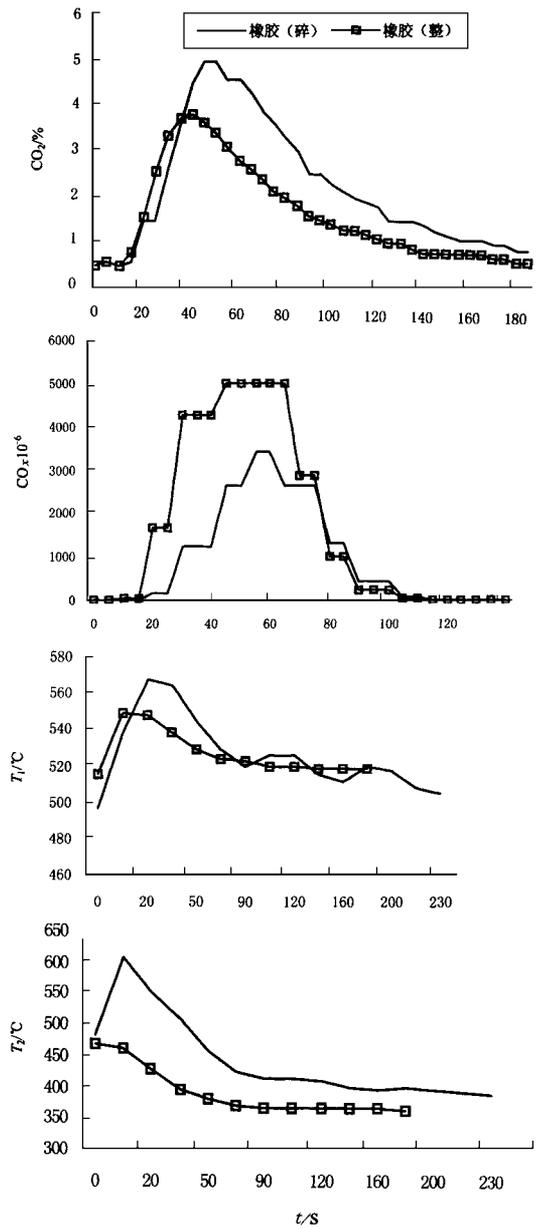


图 4 橡胶形状变化前后实验结果比较

所需的时间也越长(例如,对于水分含量为  $49\%$ 、 $83\%$  和  $89.4\%$  的试样,投入反应器后床温开始回升的时间分别是试样投入后的  $10\text{ s}$ 、 $25\text{ s}$  和  $60\text{ s}$ )。水分较高的试样燃烧时一般观察不到大面积的明亮火焰,只是能够看到在床层内有些小火星上下翻动,实际的燃烧速率已经被抑制在很低的水平上。

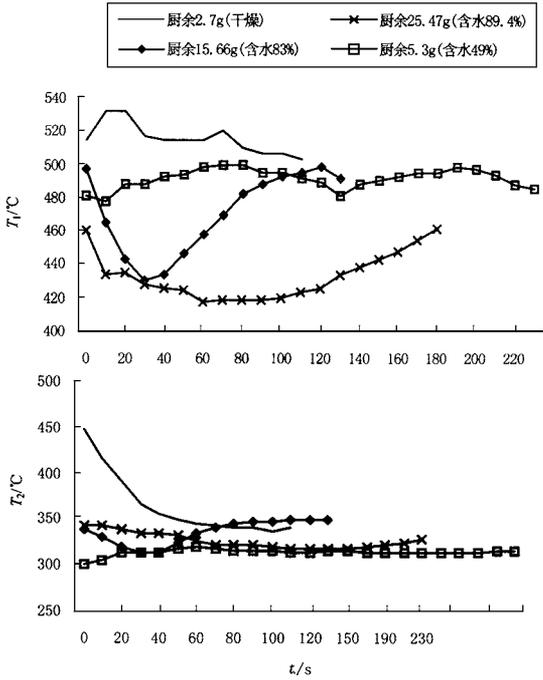


图 5 水分含量对于实验结果的影响

在等量物质不同含水量的厨余燃烧实验中,可以观察到同样的现象,水分越高,床温下降得越多;含水 49%和 89.4%的试样燃烧时基本上没有出现明显的火焰,床温回升最终没能达到初始的水平。

#### 2.4.4 风量变化对于实验结果的影响

实验时通过调节阀开度,可以控制送入流化床反应器的风量大小.当其他条件不变时,调整风量在 5.5 m<sup>3</sup>/h,6.5 m<sup>3</sup>/h 和 7.5 m<sup>3</sup>/h 的情况下进行了一些实验,部分实验结果见图 6.一般而言,当风量减少时,垃圾燃料产生 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 的百分浓度含量都会有所增加.这主要是因为风量减小后,即使是燃烧产生相同的气量,它们在总气量中的比例就会有所提高.比较明显的是,在风量减小后,CO 含量会有较明显的增加,说明不充分燃烧状况有所增加,如当风量由 6.5 m<sup>3</sup>/h 降到 5.5 m<sup>3</sup>/h 时,卫生纸燃烧产生 CO 峰值由 332 × 10<sup>-6</sup> 增加到 636 × 10<sup>-6</sup>.风量变化可以引起反应器内温度 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 水平相同趋势的变化,但都并不十分显著,这里炉内温度随时间的变化实验结果图略。

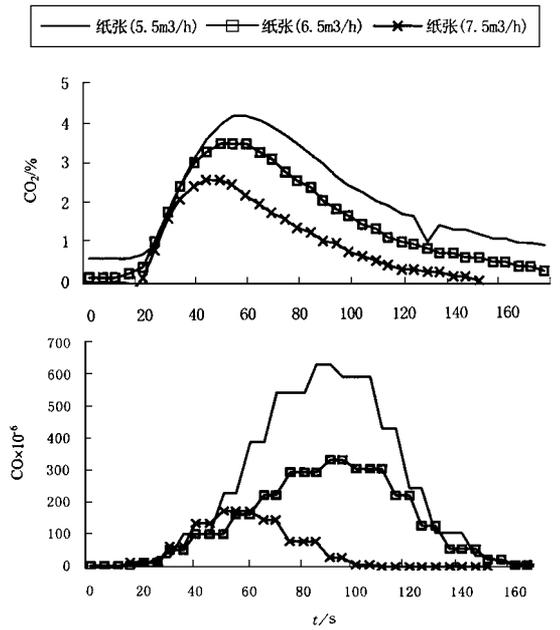


图 6 风量不同对实验结果的影响

### 3 结论

通过垃圾可燃物典型代表物在小型流化床热态实验台中燃烧特性的实验研究,得到实验条件的变化对于垃圾燃烧实验结果的影响.垃圾在流化床中燃烧的影响因素很多,当物料本身的特性(如形状、含水量),实验条件(如风量)等变化后,均对燃烧产气量(CO<sub>2</sub>、CO、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>)及燃烧实验段温度产生影响.物料剪碎后,燃烧产生 CO 量有所降低,垃圾中水分的含量的增加会引起炉内温度的降低.实验风量的减小导致燃料产物之一的 CO 含量明显增加。

#### 参考文献:

- 1 杨国清主编. 固体废物处理工程. 北京: 科学出版社, 2000. 215 ~ 224.
- 2 李绚天, 倪明江, 岑可法. 煤的燃烧过程中燃料 - NO<sub>x</sub> 的析出特性. 工程热物理学报, 1990, 11(3): 338 ~ 341.
- 3 Paul J, Peeler K, Graeme L Lane. The Fluidized Bed Combustion of Industrial Wastes in Water-based Slurry Form. Fluidized Bed Combustion, ASME 1993, 729 ~ 734.
- 4 冯波, 袁建伟, 林志杰, 刘德昌. 流化床煤燃料中氮氧化物生成的实验研究. 华中理工大学学报, 1997, 25(2): 109 ~ 111.
- 5 Pat A Wheeler, Niranjana Patel. Fluidized Bed Combustion of Municipal Solid Waste. Fluidized Bed Combustion, ASME 1995, 597 ~ 607.