

# 内旋流流化床燃烧稳定性研究

田文栋 魏小林 黎 军 吴东垠 盛宏至

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘 要** 城市生活垃圾焚烧需要稳定均匀的温度来减少燃烧产生的大气污染物。采用内旋流流化床进行了垃圾焚烧实验, 通过改变垃圾处理量、垃圾种类和流化床浓相床区高度, 研究了浓相床区温度的稳定性和焚烧炉内温度分布。

**关键词** 城市固体废弃物; 内旋流流化床; 焚烧; 温度; 稳定性

**中图分类号:** TK227.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2001)02-0245-04

## THE EXPERIMENTAL STUDY OF COMBUSTION STABILITY IN THE INTERNAL CIRCULATING FLUIDIZED BED

TIAN Wen-Dong, WEI Xiao-Lin, LI Jun, WU Dong-Yin, SHENG Hong-Zhi

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** Invariable and even combustion temperature is necessary for the municipal solid waste (MSW) incineration to decrease the emission of air pollutants. In this paper, The combustion temperature stability in the dense phase bed zone and temperature distributions in the incinerator have been studied by adjusting mass of processed waste, types of waste and particles thickness of bed in the internal circulating fluidized bed (ICFB).

**Key words** municipal solid waste; internal circulating fluidized bed; incineration; temperature; stability

## 1 前 言

焚烧<sup>[1,2]</sup>是降低城市生活垃圾危害<sup>[3~5]</sup>的一种有效方式,同堆肥<sup>[6,7]</sup>、填埋<sup>[8,9]</sup>相比,在经济发达、耕地紧张的沿海地区,焚烧的应用具有更大的前途。考虑到垃圾运输、热力应用等方面,焚烧设施一般建设在市区内或市区边缘,这些区域因人口密集,其环境状况一直受到普遍的关注,因此必须确保焚烧设施产生的二次污染物尤其是排放的大气污染物符合严格的排放标准。

城市生活垃圾的成分随产地和时间不同存在较大差异,质地不均匀,各成分的热值和含水量有很大差异<sup>[10]</sup>。焚烧过程中,若含有大量塑料等的高热值垃圾连续进入焚烧系统,容易造成大量未燃烬气体的溢出和局部高温并产生较多的酸性气体;若大量含水量高的垃圾进入焚烧系统,导致焚烧温度降低,燃烧不稳定,对 PCDD/Fs 等的分解不利。对于

垃圾焚烧系统,燃烧的稳定性与大气污染物的产生有直接关系,因此,控制大气污染物不仅需要尾气净化装置,而且需要通过燃烧状况的调整,减少大气污染物的生成量。通过改变焚烧实验台运行状况和燃料特性对内旋流流化床浓相区温度的稳定性和温度分布进行了讨论分析。

## 2 试验装置和试验条件

图 1 为内旋流流化床试验台示意图。浓相床区尺寸为  $0.5\text{ m} \times 0.24\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ ,风室被分割为大小相等的两部分,一次风根据风量的大小分为高速风和低速风进入不同的风室;在不同速度的气流作用下,流化床内的床料颗粒形成大尺度的内旋流;高速风上方的颗粒剧烈运动,为流动区,低速风上方的颗粒缓慢下降,为移动区;浓相床区内的床料颗粒是平均粒径为  $0.50\text{ mm}$  的河砂。

收稿日期: 2000-12-05; 修订日期: 2001-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.59776023) 和中国科学院重点基金资助项目 (No.KY95T-03-02)

作者简介: 田文栋 (1969-), 男, 河北辛集人, 助理研究员, 硕士, 主要从事流化床燃烧方面的研究。

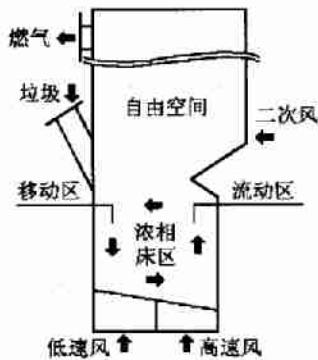


图1 内旋流流化床试验台示意图

试验中流动区流化速度  $8.0u_{mf}$  ( $u_{mf}$  为床料的初始流化速度, 单位:  $m/s$ ), 移动区流化速度  $2.0u_{mf}$ , 此时实验台的额定处理量  $60\text{ kg/h}$  (垃圾热值  $6,000\text{ kJ/kg}$ , 含水量  $5\%$ )。参照北京市近年来不同类型区域垃圾成分及热值的平均值<sup>[10]</sup>, 选择了四种典型垃圾进行焚烧, 其物理成分和热值如表 1 所示。

城市生活垃圾中主要以家庭垃圾为主, 其中又以双气 (暖气和燃气) 楼房区垃圾为主。双气区垃圾的主要成份是食品, 纸张和塑料也占有一定的比例, 灰份的含量很低, 含水量较高, 热值中等, 成分和热值波动较大; 平房区垃圾灰份含量高, 可燃份和水分的含量较低, 热值最低但波动性较小; 商业区垃圾可燃份含量较高, 灰份含量平均值为零, 水分含量中等, 热值较高且波动性较小; 街道清扫垃圾的灰份较大, 水分中等, 热值较低。

### 3 试验结果及其讨论

进行了城市生活垃圾的焚烧实验, 图 2~4 分别给出了不同垃圾处理量、不同种类垃圾、不同的浓相床区厚度时的焚烧炉内温度分布。各图沿高度方向的温度变化趋势比较类似: 在流化床底部为倾斜布风板, 布风板之下温度为空气经过预热器之后的温度 ( $160^\circ$  左右); 进入浓相床区后, 由于垃圾中固定碳的燃烧和床料的回旋运动, 温度迅速提高, 一般比较均匀的控制 在  $650^\circ\text{C}\sim 850^\circ\text{C}$  之间, 但在不同的燃烧状况下具有不同的温度; 浓相床区的顶部为垃

圾投入口, 进料过程中带入了部分空气, 而且距离进料口很近的自由空间底部布置了二次风口, 新鲜的空气进入, 使温度略有降低, 但随着挥发份等可燃气体的燃烧, 自由空间的温度进一步提高, 根据不同的垃圾品质和燃烧状况, 自由空间同浓相床区相比温度提高的幅度在  $50^\circ\text{C}\sim 300^\circ\text{C}$  之间; 在壁面上开设的若干测量孔密封不严, 而且炉体壁较薄, 散热较多 (额定下, 散热损失约  $30\%$ ), 一旦挥发份等燃烧完毕, 自由空间的温度开始逐步下降, 到左侧下降烟道处, 散热量更大, 温度下降的较快。

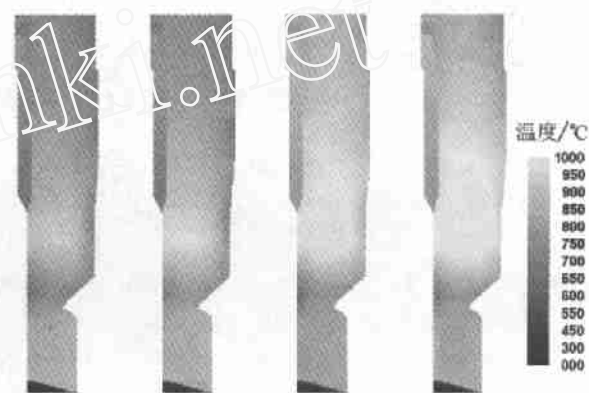


图2 不同垃圾处理量时的焚烧炉温度分布

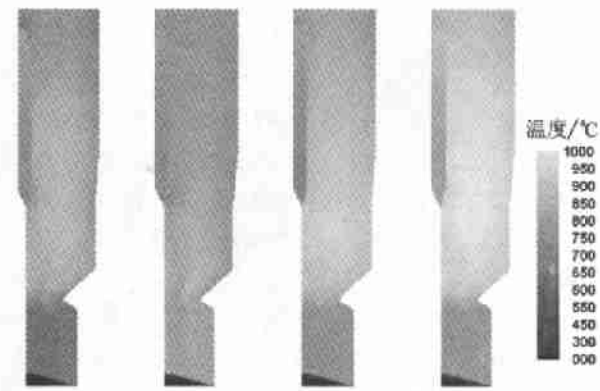


图3 处理不同类型垃圾时的焚烧炉温度分布

表 1 不同产源城市生活垃圾物理应用基成分和热值分析

类型	金属 (%)	玻璃 (%)	塑胶 (%)	纸类 (%)	布匹 (%)	植物 (%)	厨余 (%)	灰份 (%)	水分 (%)	高位热值 (kJ/kg)
商业区	2.4	5.6	16.2	34.4	1.8	0.4	11.7	00.0	27.5	8823.0
双气区	0.7	4.8	10.4	07.5	2.2	2.0	19.0	01.6	51.8	7325.0
平房区	0.5	4.2	05.0	07.8	0.6	3.8	09.6	27.5	41.0	4726.0
清扫区	2.2	5.3	10.0	09.9	0.2	8.6	08.1	30.8	24.9	6138.0

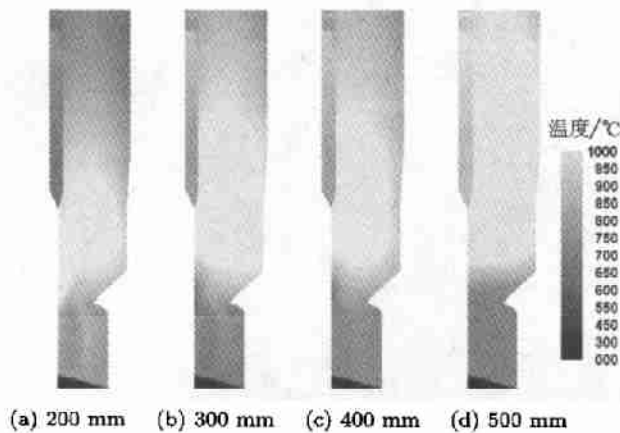


图4 不同流化床高度时的焚烧炉温度分布

### 3.1 垃圾处理量对焚烧温度的影响

采用双气区城市生活垃圾进行了焚烧实验, 垃圾处理量分别为 20 kg/h、30 kg/h、40 kg/h 和 60 kg/h, 对于每一种处理量均稳定燃烧半小时以上。图 2 给出了焚烧炉内的温度分布。实验中浓相床区床料颗粒的静止高度为 400 mm。

如图 2(a) 所示, 当城市生活垃圾的处理量较小时, 由于空气充足, 除了部分挥发份进入自由空间, 大部分挥发份和燃烧过程中生成的 CO、CH 等均在浓相床区进行燃烧, 而且垃圾中水分蒸发吸收的热量较少, 因此浓相床区的温度相对额定处理量时较高, 进入自由空间的挥发份很少, 自由空间温度提高幅度有限, 无法达到破坏 PCDD/Fs 所需要的高温及持续时间; 在如图 2(b) 所示的处理量下, 浓相床区仍然是富氧燃烧, 但随着燃料量的增加, 挥发份析出量增加, 浓相区燃烧放热量的增加大于增加的水分蒸发吸收的热量, 导致浓相床区和自由空间温度均高于图 2(a) 所示情况; 当处理量进一步提高, 水分吸收的热量继续增加, 浓相床区变为贫氧燃烧, 此时不仅有大量的挥发份进入自由空间, 而且产生大量未燃烬气体进入自由空间, 只剩下固定碳在浓相床区燃烧, 垃圾在浓相床区的放热减少, 在自由空间的燃烧放热增加, 如图 2(c) 所示, 浓相床区温度比富氧燃烧时偏低, 而自由空间温度较高; 当垃圾处理量和额定处理量相当时, 浓相床区保持较低的焚烧温度 (约 700°C~800°C), 如图 2(d) 所示, 这种温度分布有利于垃圾中玻璃、金属等的排出, 自由空间温度比浓相床区高 200°C 左右, 提供了持续的高温环境。

若使垃圾处理量超出额定处理量, 随着垃圾处理量的增加, 浓相床区的温度因水分蒸发带走大量的热量而继续降低, 当浓相床区的温度降低到 600°C

左右时, 浓相床区的燃烧变得不稳定, 若再增加垃圾处理量, 温度降低, 燃烧速度减缓, 当固定碳的燃烧放热不足以将新鲜垃圾的加热并蒸发新鲜垃圾中的水分时, 将导致熄火。

低的焚烧温度对于系统的稳定性不利, 而且难以达到破坏分解 PCDD/Fs 所需要的温度, 自由空间的不完全燃烧还将大量大气污染物排入环境。当垃圾量有较大波动时, 应及时调节空气量使垃圾完全燃烧, 垃圾量低时需要添加一定的辅助燃料调节浓相床区和自由空间的燃烧温度。

### 3.2 垃圾类型对焚烧温度和燃烧稳定性影响

对表 1 所示的四种垃圾类型进行了焚烧, 每种类型稳定燃烧半小时以上, 垃圾处理量为 60 kg/h, 浓相床区颗粒静止高度为 400 mm, 得到了图 3 所示的焚烧炉内温度分布。

平房区垃圾的品质差, 灰份高, 热值低, 浓相床区燃烧温度很低 (不足 650°C), 垃圾中的可燃份较少, 而且以较高热值为设计依据的焚烧炉浓相床区供风量, 相对与平房区垃圾来讲是比较充足的, 未燃烬的可燃气体析出较少, 因此自由空间的温度较低, 单纯焚烧平房区垃圾需要补充辅助燃料, 提高浓相床区和自由空间的温度; 清扫区垃圾的可燃份主要以枝叶、杂草、纸屑为主, 这一类物质的挥发份比塑料低, 其主要成分在浓相床区完成燃烧, 因此浓相床区的温度在这几类垃圾中最高, 由于挥发份较少, 浓相床区燃烧充分, 自由空间温度提高很少, 单纯焚烧清扫区垃圾需要补充气体或液体燃料提高自由空间的焚烧温度; 双气区和商业区垃圾有相似之处, 纸张和塑料的含量较其它类型的垃圾高, 既有一定的挥发份, 又有一定的固定碳, 可以保持比较合理的浓相床区和自由空间温度, 由于商业区垃圾热值较高, 产生的可燃气体较多, 自由空间的温度较高。

利用测得的流动区和移动区温度  $T_i$  (各 100 次,  $i = 1 \sim 100$ ), 求得各区的平均温度  $T$ , 并利用式 (1) 得到温度分布的均方差  $\sigma$ , 结果见表 2。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T)^2}{n}} \quad (n = 100) \quad (1)$$

床层内的平均温度与垃圾组成及热值有直接关系, 挥发份少、热值高的垃圾燃烧时, 浓相床区温度较高, 反之温度偏低, 均方差  $\sigma$  代表了温度的波动平均值, 数值越大, 温度波动越剧烈。垃圾中水分的含量较高, 而且进料间歇进行, 新入炉垃圾中水分将吸收大量的热进行汽化, 因此焚烧含水量高的双气区垃圾时, 床温波动最大。

表 2 焚烧不同类型垃圾时的床层温度和温度稳定性

垃圾类型	移动区		流动区	
	平均温度 $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	温度分布均方差 $\sigma$	平均温度 $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	温度分布均方差 $\sigma$
商业区	817.1	16.9	827.9	18.6
双气区	758.9	21.3	761.4	23.7
平房区	623.6	18.4	638.4	19.0
清扫区	850.4	13.4	856.0	14.1

表 3 床层高度对床层温度和温度稳定性的影响

砂床静止 高度 (m)	移动区		流动区	
	平均温度 $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	温度分布均方差 $\sigma$	平均温度 $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	温度分布均方差 $\sigma$
0.20	780.3	39.4	792.2	37.2
0.30	771.2	26.0	783.3	23.1
0.40	765.7	15.7	775.6	17.8
0.50	762.6	11.5	768.1	13.4

### 3.3 浓相区高度对焚烧温度和燃烧稳定性的影响

改变流化床浓相床区高度, 同样得到各区的平均温度  $T$  和温度分布的均方差  $\sigma$ , 结果见表 3, 图 4 给出了焚烧炉内温度分布。实验采用双气区垃圾, 处理量为 60 kg/h。

床料颗粒没有参与燃烧反应, 仅仅起到蓄热的作用, 因此仅改变浓相床区的厚度其平均温度没有明显的变化, 只有在很小的床层厚度时, 浓相床区的温度略高同时自由空间的温度偏低, 可能与所使用的燃料不均匀有一定的关系。当床层很薄时, 不能形成好的内旋流, 而且蓄热量小, 对燃料特性的变动适应性差, 床内的温度分布不均匀, 存在温度较高的区域, 易发生结渣结焦等事故, 而且浓相床区的平均温度随时间的波动也比较剧烈, 焚烧过程中浓相床区的温差超过  $100^{\circ}\text{C}$ , 这对垃圾焚烧以及大气污染物排放的控制非常不利; 随着床层厚度的提高, 浓相床区横向和纵向温度分布越来越均匀, 平均温度随时间的波动逐渐减小。因此, 流化床焚烧炉在风机压头允许的情况下, 采用较厚的床层, 以稳定燃烧温度, 克服垃圾成分和热值不均匀带来的燃烧温度波动。

## 4 结 论

不同的城市生活垃圾的成分和热值存在较大的

差异, 而且质地不均匀, 易造成燃烧的不稳定。针对垃圾品质和数量的波动, 需要进行风量的调节, 必要时需要添加辅助燃料; 床层颗粒具有较好的蓄热功效, 厚床层有利于垃圾的稳定燃烧; 内旋流床具有好的内部温度分布, 有利于垃圾完全燃烧和控制大气污染物产生。

## 参 考 文 献

- [1] 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
- [2] 李斌, 池涌, 李爱民等. 造纸污泥与废水污泥流化床焚烧时  $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_2$  的排放特性研究. 工程热物理学报, 1998, 19(6): 776-779
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 张兰英, 韩静磊, 安胜姬等. 垃圾渗沥液中有有机污染物的污染及去除. 中国环境科学, 1998, 18(2): 184-188
- [6] 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
- [7] 罗宇焯, 张甲耀, 马瑛. 有害废物堆肥技术及堆肥生态系统研究进展. 上海环境科学, 1999, 18(10): 478-480
- [8] 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
- [9] 李雁, 张淑娟, 陈鲁言等. 垃圾填埋场内部气体浓度等的时空变化特征. 环境科学研究, 1999, 12(6): 43-46
- [10] 田文栋, 魏小林, 黎军等. 北京市城市生活垃圾特性分析. 环境科学学报, 2000, 20(4): 435-438