

城市固体废物的焚烧实验

田文栋,魏小林,黎 军,吴东垠,盛宏至(中国科学院力学研究所环境科学与技术中心,北京 100080)

摘要: 稳定均匀的燃烧温度是确保减少垃圾焚烧系统大气污染物排放量的一个重要因素.采用内旋流流化床(ICFB)进行了城市生活垃圾焚烧实验,探讨了不同的布风速度,垃圾焚烧量,流化床浓相区高度和不同种类垃圾对焚烧稳定性的影响,并给出了流化床内部温度和CO, NO_x, SO₂等大气污染物的浓度变化.内旋流流化床采用非均匀布风,低速风的移动区尚未流化时,浓相区温度存在一定的不均匀性,低速风区流速超过2倍初始流化速度后,浓相区温度是均匀一致的;流化床的床料具有较好的蓄热能力,较厚的床层有利于提高燃烧的稳定性和减少垃圾给料和垃圾热值的波动对燃烧温度造成的不利影响;垃圾的焚烧效果与垃圾的热值有直接关系,焚烧低热值垃圾时,为了提高焚烧温度并达到较好的排放指标,需要增加一定量辅助燃料进行助燃;内旋流流化床在燃烧稳定性以及燃烧温度控制上具有一定优势.

关键词: 城市固体废物; 内旋流流化床; 焚烧

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2001)01-0049-05

The experimental of incineration of municipal solid waste. TIAN Wen-dong, WEI Xiao-lin, Li Jun, Wu Dong-yin, SHENG Hong-zhi (Centre of Environmental Science and Technology, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China). *China Environmental Science*. 2001,21(1): 49-53

Abstract: Stable and even combustion temperature is one of important factors to decrease the emission of air pollutants from incineration system. The incineration experiment of municipal solid waste(MSW) has been completed in the internal circulating fluidized bed (ICFB). The influence of different velocity of fluidized air distribution, amount of waste, height of bed and type of waste on the incineration stability has been studied, and the internal temperature and the concentration of air pollutants such as CO, NO_x, SO₂ in the ICFB have been given. The ICFB adopts the uneven distribution of fluidized air; so its temperature is uneven when the moving bed with low air velocity is not fluidized, and is invariable when the air velocity is over $2.0u_{mf}$. The particles in fluidized bed have good ability of heat accumulation; thus the combustion stability with thick particle deepness is better with less unfavorable influence from the fluctuation of the supply and heating value of MSW. The heating value of MSW has direct influence on the incineration effect. The assistant fuel is necessary to raise incineration temperature and to attain better emission indexes when the heating value of MSW is low. The ICFB has definite priority in controlling the temperature and stability of the combust.

Key words: municipal solid waste; internal circulating fluidized bed(ICFB); incineration

城市生活垃圾产生的臭气、渗沥液、病菌、重金属等对人类活动构成多方面危害^[1-3].在对垃圾进行有效的治理过程中重要的是采用无害化处置方式对垃圾进行最终处理^[4,5].对于人口众多、土地资源紧张、经济较发达的大城市以及沿海开放城市,焚烧^[6,7]较之填埋^[8]和堆肥^[9]这两种垃圾无害化处置方式具有一定的优势.

现阶段我国垃圾具有水分高、热值低、质地不均匀等特点,焚烧过程中需要进行良好的混合.内旋流流化床^[10,11](图1)通过非均匀分段布风,形成床料颗粒的大尺度内部循环,可加剧燃

料和床料间的碰撞混合,改善燃烧效果.垃圾焚烧过程中二次污染物的产生,尤其是大气污染物(NO_x、SO₂、CO、碳氢化合物、二噁英、呋喃类PCDD/Fs等)的产生与焚烧温度、燃烧的稳定性和直接关系.稳定控制焚烧温度是焚烧系统正常运行的关键因素.

本文通过改变内旋流流化床垃圾焚烧实验台的布风速度、浓相区高度、垃圾品质和垃圾

收稿日期: 2000-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59776023);中国科学院重点项目(KY95T-03-02)

处理量,对流化床焚烧炉的焚烧温度、燃烧稳定性以及部分大气污染物排放进行了研究.

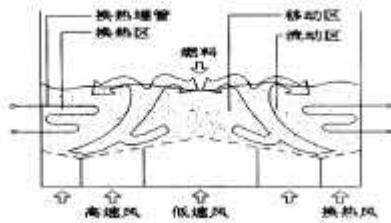


图1 内旋流流化床原理示意

Fig.1 The principal scheme of ICFB

1 实验装置及条件

内旋流流化床为矩形对称结构,且换热区不影响垃圾的燃烧过程,内旋流流化床试验装置设计为单边流化床(只有一个移动区和流动区,不含换热区),实验台从下至上主要分为浓相区、稀相区两大部分.浓相区横截面和布风板面积相同,为 500 mm×240mm,高度 1.0m,内装平均粒径 0.50 mm 的河砂作床料,一次风从浓相区底部送入,风速分为高速风和低速风,高速风区(流动区)和低速风区(移动区)面积比为 1:1,布风装置为风帽式,在一次风作用下,床料进行流化,其流化高度约为 1.0m.试验装置从浓相区向上开始逐渐扩大进入稀相区.稀相区截面尺寸为 800 mm×280mm,高度 3.5m,稀相区底部为二次风口.稀相区后为辅助设备.根据设计的供风量,焚烧实验台的额定处理量为 50kg/h(热值为 6000kJ/kg).由于焚烧实验台尺寸小,保温隔热措施不完善,散热损失大,经测定散热损失为垃圾燃料额定放热量的 30%,而一般应用中的焚烧炉的散热损失最大不超过 5%,因此实验中投入 4kg/h(热值为 20 000kJ/kg)的煤进行助燃,弥补过多散热损失.

城市生活垃圾能否作为燃料进行焚烧,主要以垃圾的热值和可燃部分的数量为依据.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^[12],选择 4 种典型区域的垃圾进行焚烧,其物理成分和高位热值如表 1 所示.

分别对改变垃圾配比、垃圾焚烧量、一次风布风速度和流化床砂床高度进行了实验.垃圾焚烧量为 25~75kg/h;流动区流化速度为 6.0~14.0 u_{mf} (u_{mf} 为床料的初始流化速度,单位:m/s),移动区流化速度为 0.0~6.0 u_{mf} ;砂床静止高度为 300~500mm.

表 1 不同来源垃圾的物理成分(%)

Table 1 Physical ingredient of municipal solid waste in different area (%)

类型	塑料	纸张	厨余	灰分	其他	水分	热值(kJ/kg)
商业区	15.0	25.0	12.0	0.0	10.0	38.0	9000.0
双气区	10.0	10.0	24.0	3.0	3.0	50.0	7500.0
平房区	5.0	10.0	10.0	35.0	5.0	35.0	5000.0
街道	5.0	15.0	30.0	20.0	10.0	20.0	6000.0

2 结果与讨论

内旋流流化床利用非均匀布风,根据床料颗粒的运动形态将浓相区分为移动区(低速风区)和流动区(高速风区).城市生活垃圾从移动区上方进入流化床,随移动区缓慢下降并析出挥发分和水分,干燥后的垃圾在浓相区燃烧.由于是不完全燃烧,温度较低(800℃左右),不会造成垃圾中金属、玻璃等熔融后堵塞布风板等事故;稀相区底部补充了二次风,析出的挥发分在稀相区继续燃烧,温度进一步提高(1000℃左右),有利于可燃气体的燃尽和 PCDD/Fs 的分解破坏.

2.1 布风速度对焚烧温度及均匀性的影响

调节高速风和低速风的量,分别测量了移动区和流动区的平均温度(图 2).实验采用双气区垃圾进行焚烧,垃圾处理量为 35 kg/h,浓相区高度为 400mm.

正常运行的流化床流动区的流化速度为几倍至十几倍初始流化速度,流动状态稳定,而移动区仅为 2.0 u_{mf} 左右,因此移动区流速变化对流动区温度基本没有影响,而且流动区温度与流动区流速也没有直接关系.由于数值接近,图 2 中未区分流动区平均温度随流动区流速的变化.

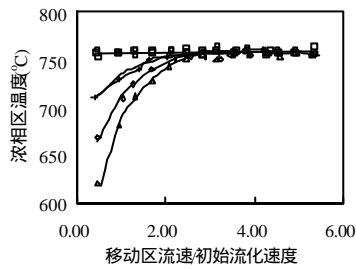


图 2 布风速度对焚烧温度的影响

Fig.2 Effects of flow velocity on incineration temperature

□ 流动区温度 ◇、◇、△ 移动区温度 流动区流速: □ 14.0 u_{mf}
◇ 10.0 u_{mf} △ 6.0 u_{mf}

当移动区流速低于初始流化速度时,床料静止,没有新垃圾进入移动区.由于缺乏空气,已经存在的垃圾也不能充分燃烧释放热量,而且移动区和流动区之间也不存在质量传递,仅依靠热传导方式由流动区向移动区传递热量,因此移动区温度低于流动区温度.随着移动区流速的提高,垃圾燃烧释放的热量增加,温度逐步提高,并且移动区开始流化,出现移动区和流动区之间的质量交换,通过床料将大量的热量从流动区携带进入移动区,同时新鲜垃圾燃料也借助流化进入移动区进行燃烧,使得移动区温度迅速升高,逐步接近流动区温度.当移动区流速达到 $2.0 u_{mf}$ 时,移动区温度与流动区温度均匀一致,不存在床温沿横向的不均匀性.

流动区流速较高,可以影响周围移动区的流化状态.当移动区流速尚未达到初始流化速度时,由于流动区的存在,使得床料颗粒开始松动,并提前进入流化,增加了不同区域之间的质量和能量传递.因此在较高的流动区流速下,移动区温度和流动区温度差距较小,而且在较小的移动区流速下,两区域的温度已经均匀稳定.

2.2 垃圾处理量对焚烧的影响

根据焚烧炉的设计参数,其额定的焚烧量为 50kg/h.改变垃圾的处理量进行焚烧,每一个特定的垃圾处理量均稳定燃烧 30min 以上,图 3 给出了稀相区、流动区和移动区的平均温度.实验采

用双气区垃圾进行焚烧,流动区流化速度为 $6.0u_{mf}$,移动区流化速度为 $2.0u_{mf}$,浓相区高度为 400mm.

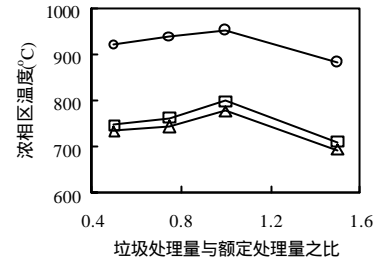


图 3 垃圾处理量对焚烧温度的影响

Fig.3 Effects of waste amount on incineration temperature

○ 稀相区温度 □ 流动区温度 △ 移动区温度

浓相区为不完全燃烧,部分挥发分进入稀相区通过加入二次风后继续燃烧,稀相区的温度高于浓相区温度.下低上高的温度分布有利于底部灰渣的排出和上部 PCDD/Fs 的分解.

垃圾处理量小于额定处理量时,空气量大于理论空气量与过量空气系数(为 1.4)的乘积,过量的空气吸收了部分热量,导致各区温度下降;垃圾处理量大于额定处理量时,若不改变空气量,部分垃圾富积在床内不能马上燃烧放热,而且还需要更多的热来烘干新鲜垃圾,因此当处理量超过额定处理量时,床层温度迅速下降.

低的焚烧温度对于系统的稳定性和适应性非常不利,而且难以达到破坏分解 PCDD/Fs 所需要的温度,不完全燃烧还将产生大量大气污染物.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,若通过调节风量不能控制燃烧温度,需要添加一定的辅助燃料或通过换热埋管等手段调节床内的温度.

2.3 垃圾类型对焚烧温度和燃烧稳定性的影响

改变垃圾种类稳定燃烧 30min 以上,连续测得各区的温度 T_i (各 100 次),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 s ,结果见表 2.均方差 s 代表了温度的稳定程度,数值越大,温度波动越剧烈.

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

表 2 焚烧不同垃圾的床层温度和温度稳定性
Table 2 Temperature and stability of bed in different waste

垃圾类型	移动区		流动区	
	平均温度	温度分布	平均温度	温度分布
	$T(^{\circ}\text{C})$	均方差 s	$T(^{\circ}\text{C})$	均方差 s
商业区	804.1	142.7	810.4	161.9
双气区	748.2	184.4	757.4	207.4
平房区	607.8	158.4	617.6	160.7
街道	880.6	143.1	889.4	156.6

实验中垃圾处理量为 35 kg/h, 流动区流化速度为 $6.0u_{mf}$, 移动区流化速度为 $2.0u_{mf}$, 浓相区高度为 400mm.

床层内的平均温度和垃圾的热值有直接关系, 高热值的垃圾将产生高的焚烧温度. 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.

垃圾热值是决定焚烧温度的重要因素, 连续焚烧低热值垃圾时, 需要补充辅助燃料.

2.4 浓相区高度对焚烧温度和稳定性影响

改变流化床浓相区高度, 同样得到各区平均温度 T 和温度分布均方差 s , 结果见表 3. 实验采用双气区垃圾, 处理量为 35 kg/h, 流动区流化速度为 $6.0u_{mf}$, 移动区流化速度为 $2.0u_{mf}$.

表 3 床层高度对床层温度和温度稳定性的影响
Table 3 Bed temperature and stability in different thickness of bed

砂床静止高度(m)	移动区		流动区	
	平均温度	温度分布	平均温度	温度分布
	$T(^{\circ}\text{C})$	均方差 s	$T(^{\circ}\text{C})$	均方差 s
0.30	745.7	252.3	757.6	265.4
0.40	743.9	188.7	755.7	193.6
0.50	748.6	101.6	756.1	118.3

改变浓相区的高度, 焚烧温度并没有明显的变化, 因此床料仅起到一个蓄热的作用. 随着床

料高度的增加, 床层内温度波动越来越小, 燃烧稳定性提高. 床料积蓄的热越大, 新投入的垃圾被加热而引起的温度降低也越小, 燃烧越稳定. 因此在外部条件得到满足时应选择较厚床层.

2.5 温度及大气污染物在流化床内的分布

实验采用双气区垃圾, 处理量为 35 kg/h, 流动区和移动区流化速度分别为 $6.0u_{mf}$ 和 $2.0u_{mf}$, 浓相区高度为 400mm, 床内没有添加石灰石等酸性气体脱除剂. 沿流化床中心线测量了燃烧温度和稀相区 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、 CO 的浓度, 如图 4 所示. 纵坐标为温度测孔和浓度测孔的位置高度, 零高度从风帽小孔处算起.

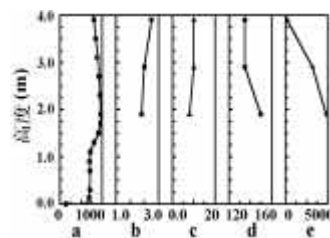


图 4 沿高度方向温度和大气污染物的分布

Fig.4 Temperature distribution and pollutants concentration in the ICFB

a. 温度($^{\circ}\text{C}$) b. CO_2 (%) c. SO_2 (mg/m^3) d. NO_x (mg/m^3) e. CO (mg/m^3)

内旋流流化床的浓相区为贫氧燃烧, 其温度比较低. 床料的大尺度内旋流提高了垃圾和床料的混合, 增强了浓相区内的传热传质, 使得浓相区温度不仅在横向而且沿高度方向同样均匀稳定. 浓相区不完全燃烧产生大量的 CO 及碳氢化合物, 因此在稀相区底部 CO 浓度非常高. 通过添加二次风, CO 及碳氢化合物开始燃烧放热, 稀相区温度迅速提高, 达到 950°C 左右. 持续的高温环境是破坏分解 PCDD/Fs 的必要条件, 随着燃烧的进行, CO 的浓度迅速减小, 在稀相区顶部仅为 $150\text{mg}/\text{m}^3$; 若增加炉体高度, CO 浓度将随燃烧的进行继续降低.

垃圾 S 含量较低, 因此燃气中的 SO_2 含量较普通炉低. 流化床焚烧垃圾的最高温度为 1000°C 左右, 几乎不生成热力 NO_x . NO_x 主要来源于垃圾中的 N 元素. 流化床焚烧城市生活垃

圾时,SO₂ 和 NO_x 的原始排放均比较小,还可以通过在床内添加石灰石等脱除部分酸性气体,再利用尾气净化装置使 SO₂ 和 NO_x 的排放完全满足要求。

风帽出口处温度为空气经过预热器之后的温度,约 150°C 左右,空气进入浓相区随着燃烧的进行,温度迅速提高.若进一步完善焚烧炉的空气预热器系统,使预热后的空气温度达到 230~250°C,则浓相区和稀相区的温度将有相应提高,分别稳定于 800°C 和 1000°C,更有利于焚烧的稳定和污染物的脱除。

3 结论

3.1 除了极端情况外,非均匀布风不会造成床层温度的不均匀;正常运行时床料颗粒在床内作大尺度回旋运动,加剧了传热和传质,有利于床温的稳定均匀。

3.2 垃圾品质和数量的波动影响焚烧炉内温度的稳定,需要进行风量的调节,必要时需要添加辅助燃料。

3.3 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。

3.4 内旋流化床具有好的内部温度分布,有利于垃圾完全燃烧和消减部分大气污染物。

参考文献:

- [1] 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 [J]. 中国环境科学,1998,18(2): 184-188.
- [2] 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 [J]. 中国环境科学,1999,19(2): 97-101.
- [3] 施 阳. 北京市垃圾问题的现状及对策 [J]. 环境科学研究, 1998,11(3): 40-41.
- [4] 马小明,过孝民,田大庆,等.城市可持续发展环境经济评价及案例 [J]. 中国环境科学,1999,19(2): 127-132.
- [5] 曾光明,袁兴中,张盼月,等.固体废物管理行业的环境投入产出模型及其应用 [J]. 中国环境科学,1999,19(3): 253-256.
- [6] 李 斌,池 涌,李爱民,等.造纸污泥与废水污泥流化床焚烧时 NO_x 和 SO₂ 的排放特性研究 [J]. 工程热物理学报,1998,19(6): 776-779.
- [7] 江淑琴,矫维红. 城市生活垃圾的燃烧性能研究 [J]. 工程热物理学报,1998,19(5): 647-651.

[8] 钟振洋,周启祥. 垃圾卫生填埋技术 [J]. 城市环境与城市生态,1999,12(2): 45-49.

[9] 冯明谦,刘德明. 滚筒式高温堆肥中微生物种类数量的研究 [J]. 中国环境科学,1999,19(6): 490-492.

[10] Nagato S, Kamisada M, Kosugi S, *et al.* Characteristics of the Internally Circulating Fluidized Bed Boiler [A]. Proceeding of Fourth China-Japan Fluidization Science and Technology Symposium [C]. Beijing: 1991. 56-65.

[11] Ohshita T, Higo T, Kosugi S, *et al.* Formation of internally circulating flow and control of overall heat-transfer coefficient in a fluidized-bed boiler [J]. Heat Transfer-Japanese Research, 1994, 23(4): 349-363.

[12] 田文栋,魏小林,黎 军,等. 北京市城市生活垃圾特性分析 [J]. 环境科学学报, 2000, 20(4): 435-438.

作者简介: 田文栋(1969-),男,中国科学院力学研究所助理研究员,工学硕士,主要从事城市生活垃圾的焚烧处理和垃圾处理项目的环境影响评价等方面的研究工作.发表论文 30 余篇。

环保信息

• 中日环境保护合作结硕果 由国家环境保护总局和日本国际协力事业团共同组织实施的“中日友好环境保护中心项目第二阶段技术合作”总结研讨会于 2000 年 2 月 14 日在北京举行.国家环境保护总局解振华局长出席研讨会并讲话.国家环境保护总局、科技部、日本环境厅、日本国际协力事业团和日本驻华大使馆等单位的代表出席了会议。

摘自《中国环境报》
2000-12-14

• 防止有机物污染国际大会开幕 2000 年 12 月 4 日,防止有机物污染国际大会在约翰内斯堡开幕.来自 120 个国家的代表在本次会议上重点讨论制定防止有机物污染条约等问题.联合国环境规划署执行主任克劳斯·特普费尔在大会开幕式上说,有机物污染是一个全球性问题,因此需要全世界共同努力来解决.他呼吁各国政府采取有效措施,积极开展合作,防止有机污染物继续威胁生态环境和人民身体健康。

摘自《中国环境报》
2000-12-07