

非均匀布风对流化床密相床区燃烧温度的影响*

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: 由于采用非均匀布风, 内旋流流化床的移动区空气量不足, 导致燃烧不充分, 温度较低。当移动区未流化时, 密相区内存在较明显的温度不均匀性。随着移动区流速的提高, 温度差迅速减小。当移动区流速超过 $2.0 u_{mf}$ 后, 密相区温度基本均匀一致。流动区流速对密相区温度均匀有一定的影响, 流速越高, 温度越均匀。

关键词: 非均匀布风; 流化床; 焚烧; 温度; 混合; 城市固体废弃物

中图分类号: TK227.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8740(2002)03-0216-04

Effects on Dense-Phase Zone Temperature of Fluidized Bed with Uneven Air Distribution

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 Because of the uneven distribution of the fluidized air the air in the moving-bed zone of ICFB is lower than the needed amount of combustion, and the combustion in this zone is insufficient and the temperature is lower than that in the flowing-bed zone. The temperature in the dense-phase zone is uneven when the moving bed is not fluidized. The temperature difference in the moving-bed zone and flowing-bed zone is rapidly shortened with increasing the fluidized velocity in the moving-bed zone. The temperature in the dense-phase zone is invariable when the air velocity of the moving-bed zone is over $2.0 u_{mf}$. The velocity of moving-bed zone has some effects on combustion stability: the higher the velocity the more stable the combustion.

Keywords uneven air distribution; fluidized bed; incineration; temperature; mixing; municipal solid waste

在均匀布风流化床中, 流化介质及颗粒的流动受到流化床壁面的摩擦阻力影响, 流速降低, 而在流化床中心部位却具有较高的流速, 这样在壁面附近的流速沿流化床横向存在较大的速度梯度, 形成壁面附近颗粒的涡旋运动, 表现现象为颗粒小范围的内旋流^[1,2]。

人为将流化介质沿流化床宽度非均匀布置, 同样可以造成颗粒的内旋流, 该内旋流是分布在整个床层内的大尺度的内部循环。内旋流的存在明显改善了流化床的横向扩散和混合, 使床内温度和浓度等参数趋

向均匀一致。内旋流流化床具有较好的混合特性, 在化工、能源和环境等领域^[3,4]有一定的应用, 尤其是焚烧城市生活垃圾这种特殊燃料时具有一定的优势。

焚烧同堆肥^[5,6]、填埋^[7,8]相比, 是最大限度降低城市生活垃圾危害^[9-11]的一种方式。但城市生活垃圾有质地不均匀、热值和成分波动剧烈等特点^[12], 对燃烧的稳定性和污染物的控制提出了较高的要求^[13,14]。内旋流可以促进垃圾在床内的均匀分布, 快速平衡床内的温度。均匀的温度保证了垃圾焚烧时大气污染物排

* 收稿日期: 2001-04-09。

基金项目: 国家重点基础研究发展项目(H1999022101); 国家自然科学基金资助项目(59776023);

中国科学院重点课题资助项目(KY95T-03-02)。

作者简介: 田文栋(1969-), 男, 硕士, 助理研究员。E-mail: dtee@imech.ac.cn。

放符合严格的城市居民区标准, 使垃圾焚烧项目建立在市区内或城市附近成为可能, 满足垃圾处理项目对垃圾运输、处置费用和热电应用等方面的要求。

内旋流流化床的关键为非均匀布风, 存在流速较低的区间。在床内流化介质流速不同, 燃烧强度和燃烧温度将存在一定的差异, 因此流化速度和横向扩散均影响内旋流流化床的温度分布。焚烧法处置城市生活垃圾对温度的要求比较严格, 以保证焚烧彻底及减少二次污染物产生。本文通过改变非均匀布风内旋流流化床的高速风和低速风流速, 得到了流化床密相区燃烧温度, 分析了非均匀布风对垃圾焚烧温度的影响。

1 试验装置和试验条件

如图1所示, 内旋流流化床采用非均匀布风, 两侧布风速度较高, 为几倍至十几倍颗粒的初始流化速度。该速度已经接近或超过颗粒的携带速度。高速风进入浓相床区后, 携带床料向上迅速运动, 到达浓相床区顶部后, 在反射板和破裂的气泡共同作用下将大部分颗粒抛洒到中间区域。高速风上方的颗粒运动剧烈, 中间布风速度较低, 与初始流化速度相当, 促使低速风上方的颗粒松动并开始流化, 在流化床底部横向运动, 填补高风区颗粒被带走之后的空缺。低速风上方的颗粒则缓慢下移。高风区上方的颗粒剧烈流化, 为流动区; 低速风上方的颗粒缓慢下移, 为移动区。

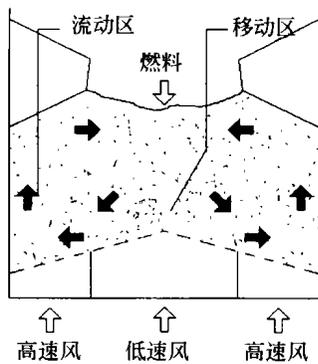


图1 内旋流流化床示意

内旋流流化床为矩形对称结构, 形成两个对称的大尺度内旋流。实验仅对其中一个的温度分布进行了研究, 内旋流流化床热态试验装置为单边流化床(如图2所示), 实验台分为密相区和稀相区两部分。密相区

横截面和布风板面积 500 mm × 240 mm, 高度 1.0 m, 内装平均粒径 $d_p 0.50$ mm 的河砂作床料; 床料的流化高度约为 1.0 m, 一次风从密相区底部送入, 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, 风帽开孔率平均为 0.6%。在内旋流流化床的流动区和移动区分别布置了多个热电偶测量各区的温度。试验装置从密相区向上开始渐扩进入稀相区, 稀相区截面尺寸为 800 mm × 280 mm, 高度为 3.5 m。运行时流动区流化速度为 $10.0u_{mf}$ 左右 (u_{mf} 为床料的初始流化速度, m/s), 移动区流化速度为 $1.5u_{mf}$ 左右。根据设计的供风量, 焚烧实验台的标定处理量为 60 kg/h (热值为 6000 kJ/kg, 水分 50%, 焚烧系统过量空气系数为 1.4)。

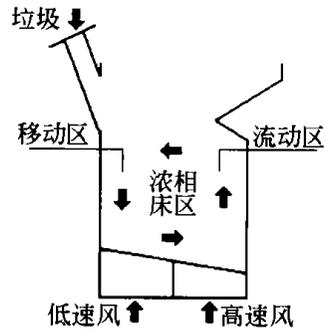


图2 实验装置示意

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标定放热量的 30%, 而一般应用的焚烧炉散热损失最大不过 5%, 因此实验中需要投入 4 kg/h (热值为 20000 kJ/kg) 的煤助燃, 弥补过多的散热损失。

城市生活垃圾能否作燃料燃烧, 主要以垃圾热值的高低和可燃成分的含量为依据。北京市居民区垃圾数量较大, 其热值满足垃圾焚烧的基本要求^[12]。试验采用双气居民区垃圾, 其主要成分含量和热值如表1所示, 垃圾焚烧量 60 kg/h, 流动区流化速度 $6.0u_{mf} \sim 18.0u_{mf}$, 移动区流化速度 $0.0 \sim 6.0u_{mf}$ 。

2 结果及讨论

在内旋流流床中, 城市生活垃圾从移动区上方进

表1 双气区垃圾的物理成分

塑料/%	纸张/%	生物质 /%	灰分/%	其它 /%	水分/%	高位热值/(kJ · kg ⁻¹)
10.0	10.0	24.0	3.0	3.0	50.0	7500.0

注: 生物质包括纸张、草木和植物、厨余等; 其它包括金属和玻璃等不燃物。

入流化床, 随移动区缓慢下降并析出挥发分和水分, 干燥后的垃圾在密相区燃烧。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, 析出挥发分在稀相区继续燃烧, 温度提高(1 000 左右), 有利于可燃气体燃尽和 PCDD/Fs 的分解破坏。

非均匀布风造成了内旋流流化床颗粒的不同流态, 调节高速风和低速风量之后, 通过调整燃料量的大小, 将流动区温度控制在 750 左右, 并使流动区和移

动区温度在一定时间内基本保持不变, 分别测量移动区和流动区的温度。图 3 给出了流动区流化速度 u_f 分别为 $6.0u_{mf}$ 、 $10.0u_{mf}$ 、 $14.0u_{mf}$ 、 $18.0u_{mf}$ 时, 流动区和移动区平均温度随移动区流化速度的变化。图中横坐标为移动区空气流速, 纵坐标为密相区的温度。实验过程中, 由于床区温度的波动, 空气密度和粘性系数发生改变, 初始流化速度存在一定差异, 因此流量计上相同的冷空气流量对应的流化倍率有所不同, 导致图 3 中数据点沿 x 轴存在一定的分散。

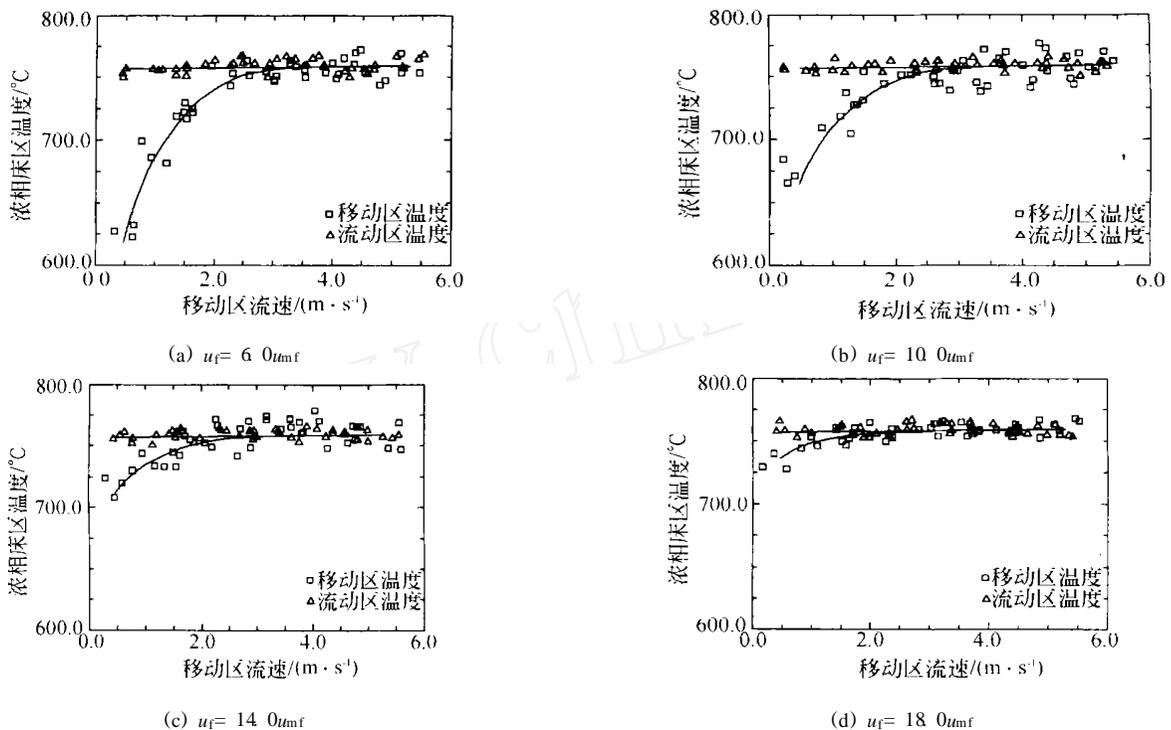


图 3 布风速度对焚烧温度的影响

正常运行的内旋流流化床平均流化速度超过 5 倍初始流化速度, 流动区流动状态稳定, 而移动区流化速度不足 $2.0u_{mf}$, 因此移动区流速的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, 主要受密相区空燃比的影响。从图 3 中可以看出流动区温度基本保持稳定。

在非均匀布风内旋流流化床中, 由于移动区流速很低, 颗粒密实, 只进行缓慢的移动, 和颗粒快速运动的流动区之间界限比较明显, 形成一个边缘较清晰的移动区三角形。该三角形的高度与流动区流速的大小存在一定的关系, 当移动区流速固定后, 随着流动区流速的提高, 移动区三角形高度逐渐减小, 更多的颗粒进入流动区, 做快速的回旋流动。

当移动区流速低于初始流化速度时, 低速风上方大部分床料颗粒静止, 移动区三角形高而且宽, 基本没有新垃圾进入移动区。由于布风量小缺乏空气, 已经存

在的垃圾也不能在移动区进行充分燃烧释放热量, 而且移动区和流动区之间颗粒的相对交换较少, 仅仅依靠热传导方式由流动区向移动区传递热量, 所以移动区温度明显低于流动区温度。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, 移动区和流动区之间的质量交换加剧, 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燃烧, 使得移动区温度迅速提高, 逐步接近流动区温度。当移动区流速达到 $2.0u_{mf}$ 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。

由于流动区流速较高, 影响了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, 使得移动区边缘的床料颗粒开始松动, 并提前进入流化, 增加了不同区域之间的质量和热量传递。因此在较高的流动区流速下, 移动区平均温度和流

动区平均温度差距较小,而且在较小的移动区流速下,两区域的温度已经均匀稳定。

图4给出了移动区流化速度为 $1.0u_{mf}$,而流动区流化速度不同时密相区的温度分布。由于移动区流速较低,密相区内存在低温区域,此低温区和移动区三角形相当;当流动区流速较低时,流动区颗粒的动量以及对移动区颗粒的作用均较小,形成较大的移动区三角形和低温区域;随着流动区流化速度的提高,更多的

移动区颗粒受到流动区颗粒的作用,使得移动区三角形高度减小,移动区内颗粒的运动速度增加,迅速消除了密相区内的温度不均匀。

3 结 语

内旋流流化床采用非均匀布风,床料颗粒在床内进行大尺寸的循环流动,可以加强颗粒间的传热传质,

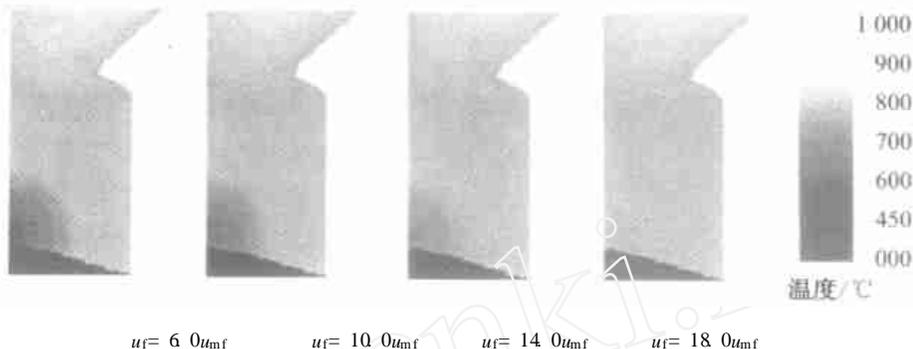


图4 密相区温度分布

因此在内旋流流化床的大部分区域内,温度是均匀一致的。但由于供风量沿横向存在不同,导致床内各部分燃烧强度存在一定的差异,若颗粒的混合较弱,容易出现部分低温区域。

内旋流流化床低速风上方存在颗粒缓慢移动的移动区三角形。在这一部分,新鲜燃料的挥发分析出以及干燥预热过程需要吸收一定的热量。较低的风速使得该区域燃料的燃烧放热量小于其它区域,缓慢的颗粒运动不利于移动区和其它高温区域之间的热量交换,在内旋流流化床移动区容易出现低温区。

移动区和流动区之间的温度差主要和移动区流速大小有关,但受流动区流速大小的影响。当移动区流速低于颗粒的初始流化速度时,流化床内部存在一定的温差,随着流化速度的提高,温差逐步减小;当移动区流速为2倍初始流化速度时,流动区温度和移动区温度基本一致;在相同移动区流化速度下,流动区流速越高,不同区域的温差越小。适当提高移动区流速,不仅可以提高该区的燃烧强度,而且可以增大和高温区域之间的换热,降低床内温度的不均匀性。

参考文献:

[1] Harris B J, Davidson J F. A cone-annulus deposition model for circulating fluidized bed riser[A]. *Circulating Fluidized Bed Technology II*[C]. Basu P, Large J F ed Pergamon Press, 1988: 147-

154

- [2] Rhodes M J. Modeling the flow structure of upward flowing gas-solid suspensions[J]. *Power Technology*, 1990, 60: 27- 38
- [3] 郑礼胜, 施汉昌, 钱 易. 内循环三相生物流化床处理生活污水[J]. *中国环境科学*, 1999, 19(1): 51- 55
- [4] 周 平, 何嘉汉, 钱 易. 内循环生物流化床反应器载体挂膜特性的研究[J]. *环境科学学报*, 1998, 18(1): 68- 72
- [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[J]. *中国环境科学*, 1999, 19(6): 490- 492
- [6] 罗宇焯, 张甲耀, 马 璞. 有害废物堆肥技术及堆肥生态系统研究进展[J]. *上海环境科学*, 1999, 18(10): 478- 480
- [7] 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
- [8] 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[J]. *环境科学研究*, 1999, 12(6): 43- 46
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 田文栋, 魏小林, 黎 军, 等. 北京市城市生活垃圾特性分析[J]. *中国环境科学*, 2000, 20(4): 435- 438
- [13] 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
- [14] 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 SO_2 的排放特性研究[J]. *工程热物理学报*, 1998, 19(6): 776- 779