

内旋流流化床内颗粒运动规律的试验与数值研究

张春霞¹, 张宇¹, 魏小林¹, 盛宏至¹, 田文栋²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

摘要: 通过冷态试验与数值模拟研究了不同布风下装有“ ∇ ”字型布风板的内旋流流化床的流动特性, 并进行了对比。气固两相数值模拟结果表明, 固相流场产生了大尺度旋流, 而且与试验观察到的现象相似。对固相颗粒速度分析表明非均匀布风使内旋流流化床的底部和顶部产生了气、固两相强烈的横向和纵向运动。相比较来说, 对称的非均匀布风扩散能力要比均匀布风的扩散能力强。

关键词: 内旋流流化床; 气固两相流; 扩散; 数值研究

中图分类号: TK16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8740(2007)02-0157-06

Experimental and Numerical Research on the Particles Movement in the Internally Circulating Fluidized Bed

ZHANG Chun-xia¹, ZHANG Yu¹, WEI Xiao-lin¹, SHENG Hong-zhi¹, TIAN Wen-dong²

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;

2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The experimental and numerical research in a cold model of internally circulating fluidized bed (ICFB) with “ ∇ ” type of air distributor was conducted to analyze the characteristics of the particles movement. And the obtained two kinds of results were compared for various operating conditions. Results of numerical simulation show that the large scale circulating flow in the bed is formed, similar with the phenomena in experiments. The lateral movement of particles may become very strong in the top and bottom of the bed. And the particle diffusion in the bed with uneven air distributions is better than that with even air distributions.

Keywords: internally circulating fluidized bed; gas solid flow; diffusion; numerical research

非均匀布风使流化床床内固体颗粒产生大尺度内旋流, 改善了燃料横向扩散、偏析特性, 使燃料能在床内迅速干燥、碰撞、破碎并着火燃烧。目前对内旋流流化床在不同布风板形状和布风方式下的床内床料扩散, 国内已经进行了相关研究工作。Bin Yin 等^[1]应用 DEM(discrete element method) 模型研究了流化床初始阶段颗粒的流化扩散过程。刘安源等人^[2]则采用欧拉-离散单元方法模拟了鼓泡流化床内初始阶段气固两相流动特性, 而且其结果与相关试验结果定性一致。山东大学研究了一种类似于射流喷动床的 ∇ 字型布风板流化床^[3], 该型流化床最早在英国研制。这种带有 ∇ 型布风板的内循环流化床结构简单, 床内颗粒的横向混

合强烈, 能提高燃烧效率和脱硫剂利用率, 并已经开发成功 ∇ 型布风板流化床锅炉^[4]。此外, 路春美等人又进一步研究了 ∇ 型内循环流化床中颗粒动力特性^[5]。魏小林等人对床料扩散系数的研究表明, ∇ 型布风板的横向扩散系数最大, ∇ 字型布风板较小, 鼓泡床最小^[6]。此外, 他们还建立并求解了颗粒扩散方程, 计算结果和试验结果基本吻合^[7]。徐旭等^[8]研究表明, 增大流化风速和布风板倾角能够强化颗粒的横向扩散和流化床的内旋流程度。孙满弟^[9]对内旋流流化床中的颗粒流动特性进行了数值模拟, 研究表明, 非均匀布风使床的顶部和底部产生了气固两相强烈的横向运动。

由以上研究成果可知, 研究非均匀布风下 ∇ 字型

收稿日期: 2006-03-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50376068; 59776023).

作者简介: 张春霞(1983—), 女, 硕士研究生, springxiazhang@imech.ac.cn.

布风板流化床中颗粒的扩散特性是很有意义的. 笔者首先通过试验,研究了采用 字型布风板时内旋流流化床内的颗粒初始流态化过程,并对此过程进行数值模拟,得到不同布风下的流化床内气固两相的流动扩散特性,同时对各个工况进行了对比,其结果与试验现象基本一致,而且发现非均匀布风的工况更利于颗粒的扩散.

1 试验及其结果分析

1.1 试验系统

为便于研究,选用密度为 28.8 kg/m^3 ,平均粒径为 3 mm 的聚乙烯泡沫塑料小球为床料. 流化床的长、宽、高为 $0.13 \text{ m} \times 0.36 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$,3 个风室横截面面积比为 $1:2:1$,布风板倾斜角度约 18° ,形状为 字型. 初始床料的堆积高度为 0.2 m ,因流化床横截面为矩形,且只沿横向不均匀布风,纵深方向为均匀布风,沿纵深方向能量和质量传递明显小于横向,所以可视为二维流场. 试验采用 SONY 摄像机拍摄流场图像. 试验系统示意图见图 1.

1.2 试验结果及分析

本试验设计了 3 个工况.

1) 工况 1

3 个风室布风从左到右依次为 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 和

$20 \text{ m}^3/\text{h}$,由于 3 个风室横截面面积比为 $1:2:1$,因此对应的空床流化速度为 0.4748 m/s 、 0.2374 m/s 和 0.4748 m/s .

2) 工况 2

3 个风室布风从左到右依次为 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $15 \text{ m}^3/\text{h}$,流速为 0.3561 m/s .

3) 工况 3

3 个风室布风从左到右依次为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $40 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $10 \text{ m}^3/\text{h}$,对应的空气流速为 0.2374 m/s 、 0.4748 m/s 和 0.2374 m/s . 试验中,对于颗粒初始流态化过程,拍摄了不同时刻的图像.

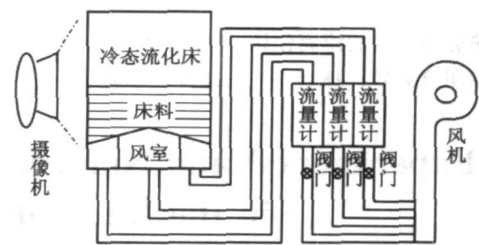


图 1 实验系统示意

图 2 为工况 3 内旋流流化床内颗粒从初始流化至稳定流化的过程图像,可以看到,工况 3 中间风室上部的区域先产生气泡,并向上运动,当运动到床层界面时气泡破裂,周围的颗粒被抛洒到自由空间,经过一段时

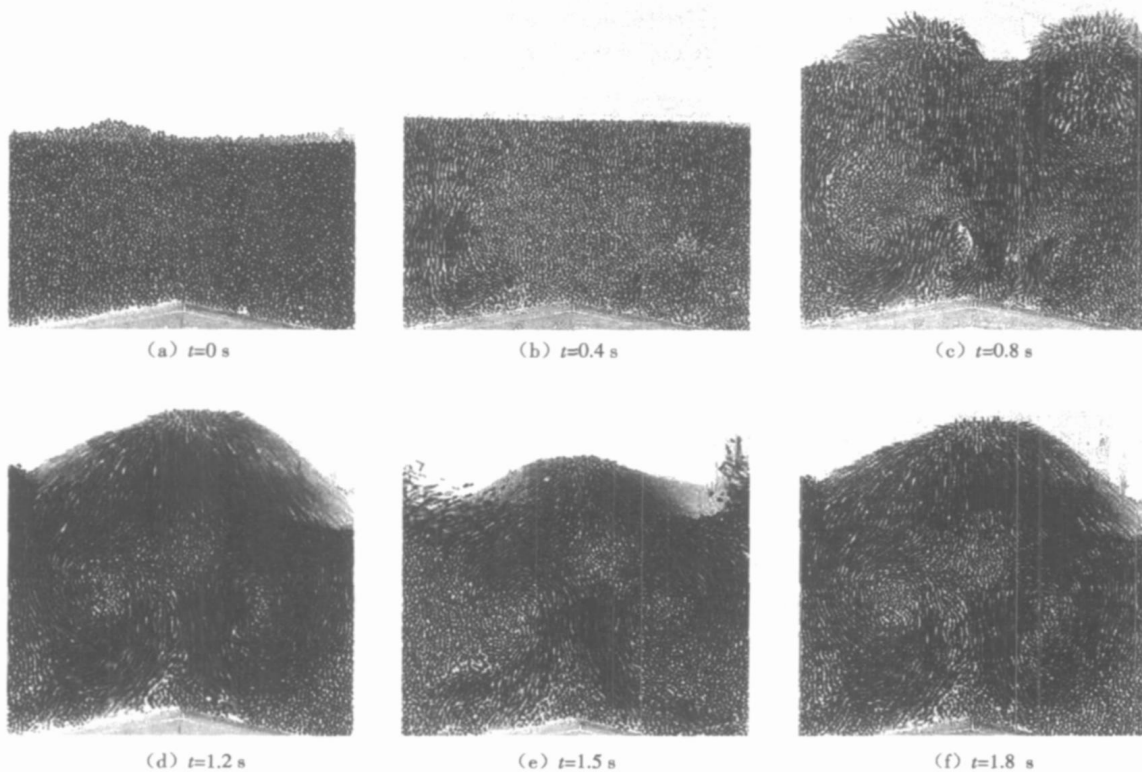


图 2 工况 3 流化初始阶段颗粒运动图像

间回落到靠近壁面区域的上界面,而后颗粒向下运动,运动到床层底部后又移向中间区域,完成一次循环,与 Bin Yin 等人^[1]的结论相似,且床高由 0.2 m 增高到 0.38 m 左右。

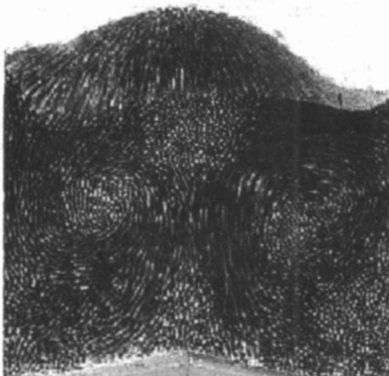
图 3 为各工况颗粒流化稳定后的流场图像。工况 1 中间风室为低速风,两边风室为高速风,所以两边风室上部的颗粒先流化起来,稳定后形成对称的两个涡,左边为顺时针,右边为逆时针,而且涡在一定范围内存



(a) 工况 1, $t = 2.0$ s



(b) 工况 2, $t = 2.0$ s



(c) 工况 3, $t = 2.0$ s

图 3 各工况流化稳定阶段颗粒运动图像

在有规律的左右摆动,此现象与 Merry 和 Davidson 的研究结论相似,在床的两侧高风区大量的气泡携带着颗粒向上运动,在床中央布置的低风区颗粒向下移动,整个床内形成两个规则的旋涡^[10];工况 2 为均匀布风,也可以在床中观察到涡的存在,由于 W 字型布风板的特点,自壁面至中心床料高度逐渐减小,所以对应的床层压降也逐渐减小,造成中间区域的气体流速高于两边的流速也形成一个较弱的旋涡,由于气流不稳定,因而出现的旋涡也不稳定;工况 3 中间风室为高速风,两边为低速风,运动规律很明显,中间风室上部的颗粒先流化起来,稳定以后在流场中形成了两个非常对称的涡,其中左边的为逆时针方向,右边的为顺时针方向,在床的上部中心由于气泡破裂并抛洒颗粒形成了一个类似“帽子”的突起物,流场稳定后,“帽子”有规律地左右摇摆,使得总体上床料的扩散较好。如果在床侧布置换热管,那么在这种不均匀布风下流化床中的传热系数随流化速度变化曲线很平缓,可以很好地控制传热系数^[11-12]。

2 数值模拟及结果分析

2.1 计算模型

本文采用双流体模型,即将模型中固体颗粒群的运动视为连续且有流体特性的流场。利用 FULENT 软件对气固流场进行数值模拟,在二维流场中建立图 4 所示坐标系,并划分网格,流场宽 0.36 m,高 0.5 m,固相颗粒床料初始高 0.2 m,初始空隙率取 0.5。因是模拟冷态试验场,温度取室温 20℃,气体和颗粒在壁面上的作用均指定为剪切。床上边界与大气相通,工作环境为大气压。

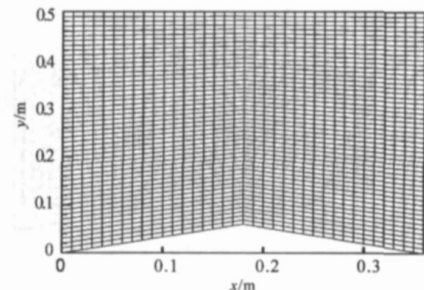


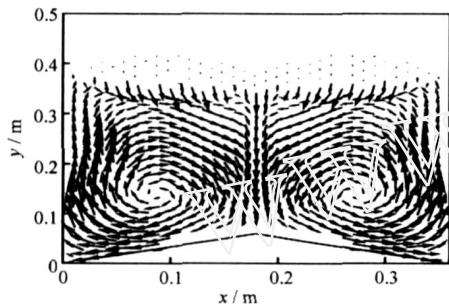
图 4 计算网格图

2.2 计算结果及分析

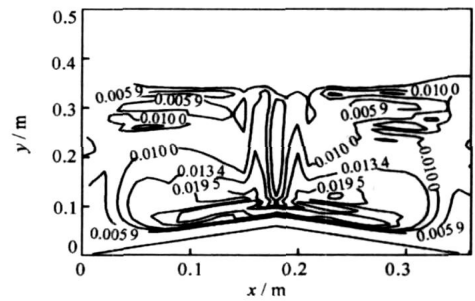
为利于观察对比各个工况的扩散状况,在床顶中部加入一定量示踪颗粒(体积分率约为 5%)进行计算。计算出示踪颗粒的稳定流场,各工况速度矢量图如

图 5 所示,与图 3 中试验观察到的颗粒流场对照,两者基本一致.工况 1 计算得到的结果是对称的,流场中的双涡与试验观察到的相似,但涡的中心比试验中的稍低;工况 2 计算出的流场中涡很对称,旋转方向也与试验观察到的相同,且很规律,但试验中的涡比较小,且时隐时现;工况 3 的计算流场与试验得到的流场也很相似,涡也是对称的,旋转方向相同,但涡的中心比试验观察到的稍低.各工况的计算结果中流化后床高也约为 0.38 m.

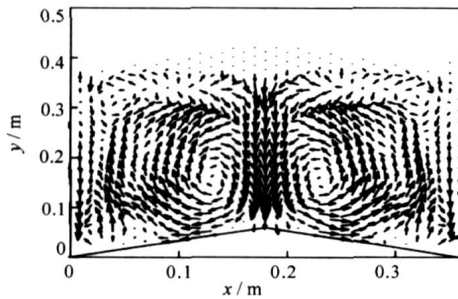
区域,工况 1,由于两侧风速高,中间风速低,因此示踪颗粒在布风板中间部分密度较大;工况 2,虽然布风均匀,但是示踪颗粒在床两侧的下部角落区域密度仍较大,这可能与 Z 字型布风板上床料压降两侧高、中间低有关系,说明倾斜布风板对于颗粒的均匀扩散也有较明显的作用;工况 3,布风板的两侧颗粒密度较大,这种现象主要是与布风方式有关,也与倾斜布风板的作用有关.对比发现,工况 1 比工况 3 的示踪颗粒分布更均匀,可见两侧风速高可以消除下部角落区域的滞留



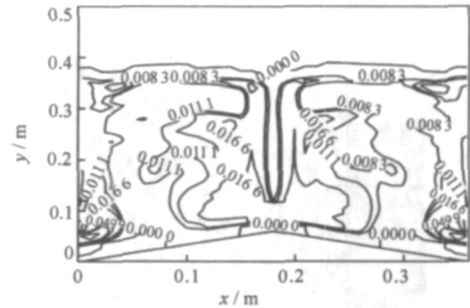
(a) 工况 1



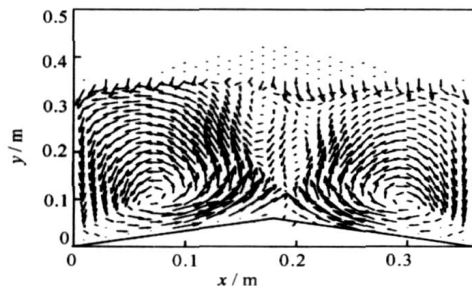
(a) 工况 1



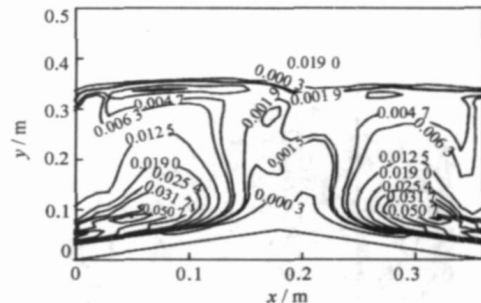
(b) 工况 2



(b) 工况 2



(c) 工况 3



(c) 工况 3

图 5 各工况流化稳定阶段颗粒速度场计算值

图 6 颗粒密度等值线图(计算值)

图 6 为模拟计算流化稳定阶段示踪颗粒密度分布等值线图.各工况颗粒密度关于中线对称分布,密度梯度很小,说明扩散比较均匀,且从床高 0.1 m 到床高 0.3 m 处颗粒分布更为均匀.对于高度为 0.1 m 以下的

区,从而大大提高颗粒扩散的均匀度.

为对比各工况并分析颗粒横向运动规律可取典型截面进行分析,因速度场关于中线对称,因此,只取左半床进行分析.从纵截面可得横向速度 u 沿床高变化

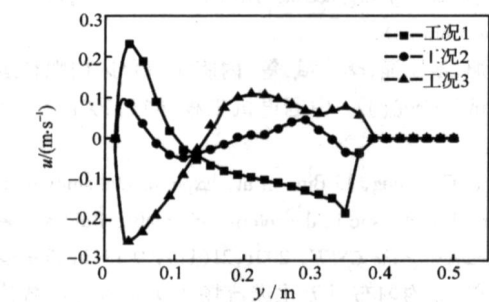
曲线(见图7),从横截面可得 u 沿床宽变化曲线(见图8),结合算出的流场图可得颗粒 u 所具有的特性.

(1)在纵截面上, u 最大值出现在底部高度约 0.05 m 到 0.10 m 左右的位置,气固两相有强烈横向运动.而床底是气泡产生发展的地方,颗粒运动使气泡破碎,增强了物料横向扩散.在床高 0.25 m 或 0.35 m 左右的地方 u 再次出现最高点,这样从床顶加入的物料会在床料的带动下迅速扩散,并向床底运动;在横截面上, u 最大值出现在 $x=0.1$ m 及 $x=0.25$ mm 的位置,因为这些位置大约是涡心所在位置,经过此处后,颗粒的纵向分速度方向发生变化, u 也随之减小直至方向

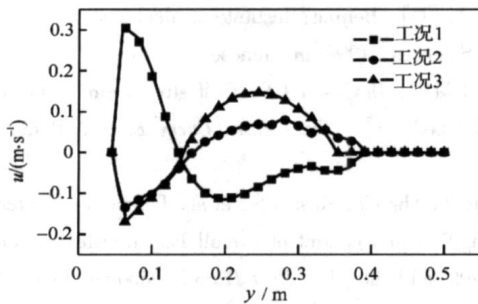
发生变化,从而完成一次物料循环.

(2)各工况 u 变化趋势相似,不管对于纵截面还是横截面, u 均先由零增加到最大值,之后减小为零,而后改变方向增大至第 2 个最大值后,再减小为零,但横截面上的速度分布更有规律,表现出双涡流动结构,在横向上更为对称,而纵向上可能受气泡破碎的影响.而且,截面 $x=0.18$ m 上 u 均小于另外两纵截面上的值,此截面也正是左右两涡的对称面.

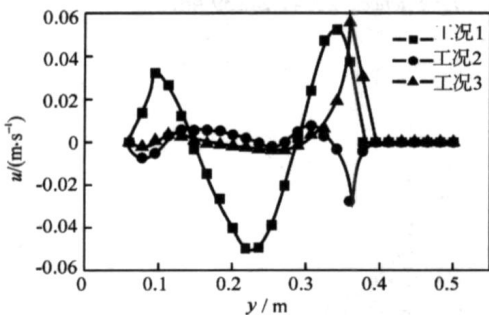
(3)对比后可知各截面对应点上工况 1 与工况 3 的 u 均大于工况 2,所以其扩散能力比工况 2 强,即非均匀布风比均匀布风流化床中的颗粒扩散能力要强.



(a) 截面 $x=0.045$ m

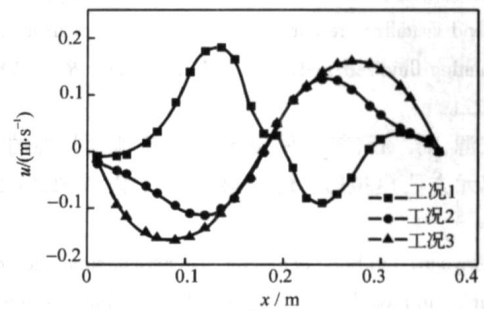


(b) 截面 $x=0.135$ m

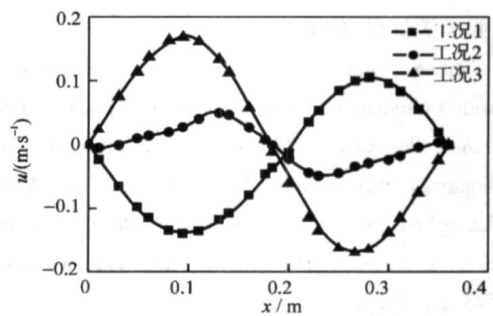


(c) 截面 $x=0.18$ m

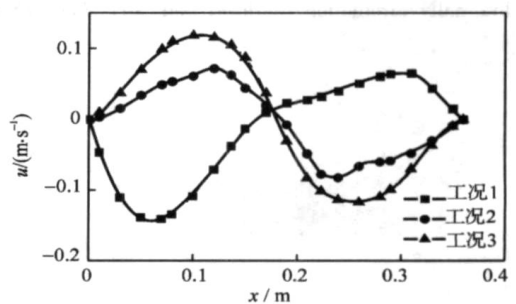
图7 纵截面上颗粒横向速度分布曲线



(a) 截面 $y=0.1$ m



(b) 截面 $y=0.2$ m



(c) 截面 $y=0.3$ m

图8 横截面上颗粒横向速度分布曲线

3 结 语

本文通过冷态试验与数值模拟研究了非均匀布风和均匀布风下 T 字型布风板流化床的颗粒运动及颗粒密度分布规律,两者结果基本一致.在流化床相同截面上,不均匀布风工况中的横向扩散速度总比均匀布风工况的横向速度大,这样床料扩散很迅速,有利于燃料的燃烧与传热,提高燃烧效率.

参考文献:

- [1] Bin Yin, Zhang M C, Dou B L, et al. Discrete particle simulation and visualized research of the gas-solid flow in an internally circulating fluidized bed[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2003, 42: 214-221.
- [2] 刘安源,刘石,姜凡. 鼓泡流化床流动特性的欧拉-离散单元方法模拟[J]. *燃烧科学与技术*, 2003, 9(2): 148-152.
Liu Anyuan, Liu Shi, Jiang Fan. Numerical simulation of hydrodynamics in a bubbling fluidized bed by eulerian discrete element method[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2003, 9(2): 148-152 (in Chinese).
- [3] 邵延玲,栾涛. 彭泡床颗粒内循环动力特性研究[J]. *山东工业大学学报*, 1990, 20(1): 61-67.
Shao Yanling, Luan Tao. Dynamic characteristics of particles flow with a circulation in bubbling bed[J]. *Journal of Shandong Polytechnic University*, 1990, 20(1): 61-67 (in Chinese).
- [4] Xu Bingsong, Shao yanling, Lu Chunmei, et al. A new inter-circulating bed boiler[C]. *2nd Asia Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization*. Beijing, 1993: 519-523.
- [5] 路春美,许炳松. 内循环流化床颗粒动力特性的研究[J]. *热能动力工程*, 1997, 12(5): 335-338.
Lu Chunmei, Xu Bingsong. Dynamic characteristics of particles in a internally circulation fluidized bed[J]. *Heat Energy Dynamical Engineering*, 1997, 12(5): 335-338 (in Chinese).
- [6] 魏小林,田文栋,黎军,等. 废弃物颗粒在非均匀布风流化床中的横向扩散特性[J]. *燃烧科学与技术*, 2001, 7(4): 290-293.
Wei Xiaolin, Tian Wendong, Li Jun, et al. Characteristic of lateral diffusion of waste particles in fluidized bed with uneven air distribution[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2001, 7(4): 290-293 (in Chinese).
- [7] 魏小林,田文栋,盛宏至. 流化床焚烧炉中颗粒扩散特性理论研究[J]. *工程热物理学报*, 1999, 20(5): 462-466.
Wei Xiaolin, Tian Wendong, Sheng Hongzhi. Theoretical study of particle diffusion characteristics in fluidized bed incinerators[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 1999, 20(5): 462-466 (in Chinese).
- [8] 徐旭,池涌,李斌,等. 内旋流流化床内颗粒运动特性的试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2001, 21(11): 9-13.
Xu Xu, Chi Yong, Li Bin, et al. Experimental study on particle motion characteristic in the internal circulating fluidized bed[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(11): 9-13 (in Chinese).
- [9] 孙满弟. 非均匀布风流化床流场的实验研究与数值模拟[D]. 北京:中国科学院力学研究所, 1998.
Sun Mandi. Experimental Study and Numerical Simulation of the Flow Field for the Fluidized Bed with Uneven Distribution of Fluidized Air[D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1998 (in Chinese).
- [10] Merry J M D, Davidson J F. Gulf stream circulation in shallow fluidized beds[J]. *Trans Instn Chem Engrs*, 1973, 51: 361-368.
- [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] Sheng Hongzhi, Wei Xiaolin, Li Jun, et al. Heat transfer study of external superheater of CFB incinerator[J]. *Environmental Engineering Science*, 2004, 21: 39-44.