

内循环流化床颗粒动力特性的研究

路春美 许炳松 (山东工业大学)

〔摘要〕 本文介绍了 V 型内循环流化床中颗粒动力特性的试验研究结果,包括颗粒内循环的运动轨迹,床层内压力分布特性及流态化速度等。

关键词 内循环流化床 动力特性 流态化速度

分类号 TK 224.11 TK 229.66

0 引言

流化床燃烧技术,是一种高效低污染洁净燃烧方式,多年来已引起世界各国的重视,并取得迅速发展。近年来出现的内循环流化床^[1,2],在提高床的均匀性,延长颗粒在床内的运动路径,减少飞灰含碳损失,提高燃烧效率等方面都取得了很大进展。具有 V 型布风装置的内循环流化床燃烧技术已成功地运用于工业锅炉的设计与设计与改造中,本研究主要探讨了该床中颗粒内循环的运动轨迹,床内压力分布特性及颗粒的流态化速度等。

1 试验系统与物料特性

试验系统如图 1 所示,其主体是一个具有 V 型布风板的二维床,断面为 1000 mm×50 mm,高

2 m。床层前后采用透明的有机玻璃,布风板上装有 $\phi 12$ 的柱型风帽。风机将空气送至风室,经一组流量计测量并由两侧进入风箱,通过布风板进入床层后,经分离器、引风机排入大气。试验床料的物理特性见表 1。

2 试验结果与分析

2.1 V 型床中颗粒内循环运动轨迹

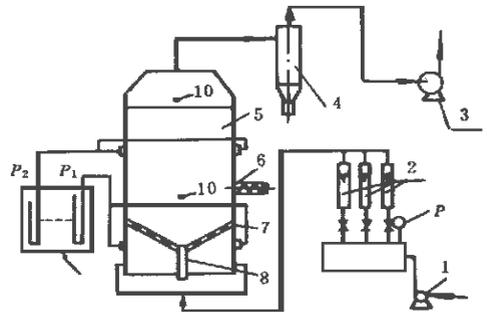


图 1 内循环流化床试验系统

1. 风机 2. 流量计 3. 引风机 4. 分离器 5. 二维床
6. 给料机 7. 布风板 8. 放料管 9. U型差压计
10. 测速探针入口

表 1 床料物理特性

床料	粒径范围 (mm)	形状系数 (ϕ)	平均粒径 d_p (mm)	真实重量 r_c (g/cm^3)
烟煤溢流灰	0.1~6.0	0.71	2.15	2.08
塑料球	4.0	0.87	4.0	0.89
玻璃球 1	1.5~2.0	1.0	1.73	2.40
玻璃球 2	1.0~2.0	1.0	1.43	2.40

如图 2 所示,布风板从中心至边缘向上倾斜,倾角为 θ 时,布风板边缘处的料层高度为 H_{eg} ,则床内各点的料层高度 H_g 为:

$$H_g = H_{og} + L \sin\theta \quad (1)$$

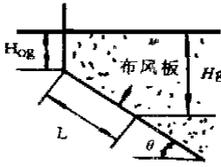


图 2 床层高度

从边缘至中心,料层高度 H_g 逐渐增加,布风板上侧各点的流动阻力增大,流量降低,布风板上各点的流速 u 可由下式确定:

$$u = \frac{2P_o \cdot g}{r_k [\alpha_b + \lambda_g (1 - X_g) H_g / l r d_p \cdot X_g]} \quad (2)$$

由式 (1) (2) 得出: 在固定床时,布风板上各点的流速,从边缘至中心逐渐降低。布风板上侧各点的压力 p_b 可用式 (3) 确定:

$$p_b = p_o - \alpha_b \frac{r_k u^2}{2g} \quad (3)$$

显然,在固定床布风板上侧各点的压力,从边缘至中心逐渐增高。

在床内加少量染色粒子,采用录像记录,观察到随着风量不断加大,风箱内压力不断增高,床料颗粒逐渐由不运动,到流化运动,到内循环运动的过程。

当风箱内的压力 p_o 比较低,速度 u 远低于固体颗粒的临界流态化速度 u_{mf} 时,只有边缘处有少量空气流过,床内颗粒处于静止状态;当 p_o 增加时,靠边缘处的气体流速增加,可以看到有若干小颗粒出现幌动;当边缘处的气流速度 u 超过 u_{mf} 时,使该处的颗粒进入了流态化,但仍未形成明显的颗粒循环运动;随着流速的进一步增大,进入流态化的颗粒逐渐增多,流态化区域增大,流化床的床层阻力 Δp_b 可用式 (4) 表示:

$$\Delta p_b = p_b = (r_c - r_k) (1 - X_g) \quad (4)$$

床内各处流速 u_g 不同,其空隙率也不同,可以表示为^[3]:

$$X_g = 0.0194 X_{mf} \left(\frac{d}{d - d_c} \right)^{0.501} \left(\frac{u_g - u_{mf}}{u_{mf}} \right)^{0.128} \quad (5)$$

由式 (3) (4) (5) 可以得出: 在 V 型床中,从边缘至中心流速逐渐降低,床层空隙率也随之降低,从而加大了布风板上侧由中心至边缘的压差。

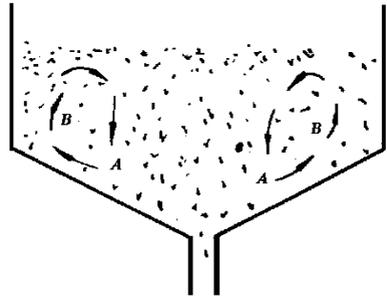


图 3 颗粒的初始运动轨迹

压差的存在使布风板上侧出现了明显的颗粒随气流由中心向边缘的流动,如图 3 所示,点 A 处颗粒流向边缘 B, A 上方的颗粒下滑补充过来;又因流化床内沿高度方向上的压力降,随着气流速度的减少而加剧,所以在流化床层的顶部,中心区域的压力低于边缘区域,这样顶部颗粒向着中心运动,在 A 和 B 之间的床层形成了明显的循环运动,随着流速的逐渐增加,循环范围逐渐扩大,直至整个床层进入内循环运动的流态化状态。

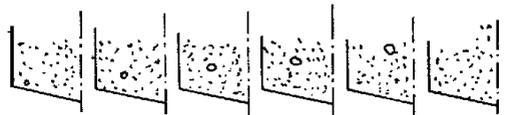


图 4 床内的气泡运动轨迹

试验中观察到: 幅地压力差的影响,在布风板边缘部位产生的许多气泡,斜向中心方向移动,图 4 是由高速录像所记录的一组气泡运动的简图(图中仅画出床的一半),气泡在床边缘处产生,在快速斜向中心运动中至中心部位爆破,气泡的这种横向运动,加强了床内固体颗粒的横向混合。由于气泡爆破,将颗粒抛向空间,大部分落在中心部位,出现了颗粒向下运动的中心区域,这样,整个床内出现了颗粒的两个大循环运动,在边缘近壁处,由于壁面的影响,还各有一个小的循环运动,颗粒在床内的循环轨迹如图 5



图 5 颗粒在床内的内循环运动

2.2 颗粒的快、慢速下降区域

研究表明: 由于颗粒在床内的两个大循环运动, 形成了颗粒的慢速下降区域 I 和快速下降区域 II, 如图 6 所示。在布风板的倾角为 30°, 烟煤溢流灰为床料时, 测得的部分颗粒下降速度列于表 2

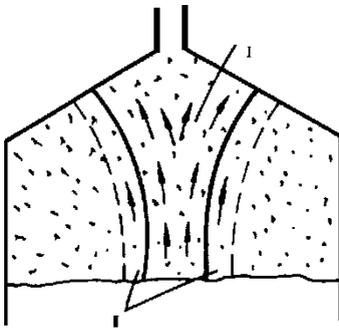


图 6 颗粒快、慢速下降区域示意图

表 2 颗粒下降速度 (cm/s)

序号	1	2	3	4
气流表观速度	1.44	1.44	1.56	1.67
II 区颗粒下降速度	3.71	8.3	3.86	7.5
I 区颗粒下降速度	0.47	0.89	0.77	1.43

可见颗粒的速度在快速下降区域是慢速下降区域的 5~10 倍。V 型内循环流化床中颗粒慢速下降区域的存在, 为锅炉的细灰燃尽提供了良好的条件。若将给煤口或飞灰再燃喷口置于该区内, 大部分颗粒将有更多的机会燃尽, 这将更有利于提高锅炉的燃烧效率和脱硫剂利用率。

2.3 流态化速度

鉴别固定床到流化床的转化, 目前大部分研究者所利用的是临界流态化速度这一概念, 但对于 V 型床, 用临界流态化速度鉴别床层颗粒是否处于流态化状态时却不尽合理, 原因是床层从固定床向流化床的转变是一个渐变过程, 对平板床而言, 该过程主要是受床内颗粒堆放的随机性、压力的波动、测量的误差等因素的影响, 故此渐变过程较短。但对于 V 型床除了以上因素的影响外, 更主要的是受床内各处料层高度不同、气流速度不均的影响, 气流速度的分布呈从中心向两端增大的趋势, 增大风量时, 两侧的颗粒最先呈悬浮状态, 然后向中心扩展, 直至整个床层颗粒进入流态化。因此, 对于 V 型床要比从固定床向流化床的转化过程长得多。

对于 V 型床, 由于床内颗粒完全流态化时的气流表观速度远大于按传统定义的临界流态化速度 u_{mf} , 对于工程应用, 我们认为: 床层颗粒全部流态化时的气流表观速度则是更有意义的数值, 为此采用一个新的参数“最小完全流态化速度”来表征 V 型床气固系统从固定床向流化床转化过程结束时, 床内平均气流表观速度。

对于三种不同角度的 V 型布风板, 其临界流态化速度与最小完全流态化速度的试验结果如表 3 所示。

表 3 临界流态化速度与最小完全流态化速度的试验结果

布风板角度	10°			20°			30°		
	玻璃珠 1	玻璃珠 2	塑料球	玻璃珠 1	玻璃珠 2	塑料球	玻璃珠 1	玻璃珠 2	塑料球
临界流态化速度 (m/s)	0.70	0.88	0.78	0.74	0.90	0.93	0.84	0.97	0.95
最小完全流态化速度 (m/s)	1.0	1.25	1.30	1.28	1.49	1.40	1.54	1.68	1.55

通过对试验数据的对比发现, V 型流化床最小完全流态化速度通常是传统的临界流态化速度的

1.3~ 2.0倍,其值因物料、粒径、布风板角度的不同而变化。

利用 H. A. Becker^[4]所推荐的结构分析法对 V 型床内有关的物质流、动量流和几何参数进行了无量纲化的综合分析得到:

$$Be^* = \left\{ \frac{d}{d_k}, Ar, Re, \frac{c}{180\theta}, \frac{H}{D} \right\}$$

通过对 5种角度、四种物料的试验结果整理、分析发现:主要参数与最小完全流态化速度之间存在着指数次方的关系,其准则方程式可以采用指数函数式表示,试验数据的回归结果为:

$$Re^* = 1.613Ar^{0.4628} \left(\frac{d}{d_k} \right)^{-0.1437} \left(\frac{\pi}{180}\theta \right)^{0.2529}$$

其计算值与试验结果的最大误差为 11.18%。

2.4 床内压力分布特性

由于 V 型流化床沿床宽方向床层高度不断变化,从而造成了一个压力差。图 7是在倾角为 15°的布风板上,测得的一典型床层内压力场分布图。可以看到,在同一床高水平上压力沿床宽由两端向中心递减,床层内等压线基本上是一组斜率与倾角成正比的平行线。

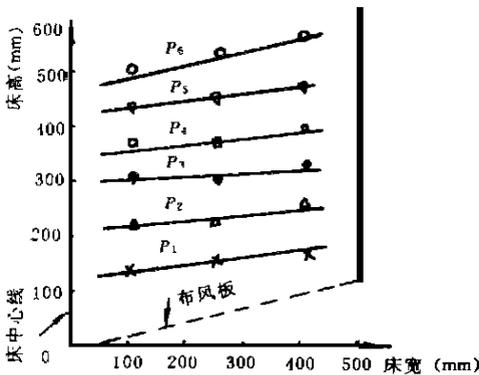


图 7 床内等压线

$$(p_1 > p_2 > p_3 > p_4 > p_5 > p_6)$$

3 结论

(1)具有 V 型布风装置的流化床,由于床内沿宽度方向的压力分布差异与床内气泡的运动趋势,使固体颗粒形成强烈的内循环运动。

(2)在颗粒的内循环运动中,存在着颗粒慢速下

降区域,将给煤口或飞灰再燃喷口布置在这个区域,可以延长细灰在流化床内的停留时间,有利于细灰的燃尽。

(3)V 型床从固定床向流化床转化的特征值应当用最小完全流态化速度描述,试验分析表明:最小完全流态化速度可以用文中给出的 Re^* 式计算。

(4)床层内等压线基本上是一组与倾角 θ 成正比的直线。

符号说明

p_0 — 风箱内压力 p_1 与床层界面以上压力 p_2 之差, (因 $p_2 = 0$, 所以可认为 p_0 为风箱内压力)。

r_s, d_k — 空气重度、密度。

X_b, ϵ — 固定床、流化床的床层空隙率。

a_b — 布风板的阻力系数。

λ_b — 固定床的阻力系数。

Θ — 床料颗粒的形状系数。

d_p — 床料颗粒的平均直径。

D, H — 流化床的床宽与床层高度。

r_s, d — 床料的真实重度与密度。

u_g — 流化床内各点流速。

X_{mf} — 临界状态下床层空隙率。

u_{mf} — 临界流态化速度。

Ar — 阿基米德数。

Re^* — 最小完全流态化速度时的雷诺数。

参 考 文 献

- 1 赵长遂等. 4₁/1₁凹型布风板组装机式沸腾炉及其冷态流动特性试验. 煤矸石煤综合利用, 1986, (2): 32~ 35
- 2 曹柏林等. 内分离循环沸腾燃烧床分离装置的试验研究. 动力工程学会第二届沸腾炉学术会议论文集. 北京, 1985 1~ 7
- 3 邵延玲等. 聚式流化床床层膨胀特性研究. 山东能源, 1987, (1): 1~ 7
- 4 Becker H. A. Dimensionless parameters— theory and methodology. Applied Science pub. London, 1976

(渠源)编辑

thermobalance and under a temperature rise of $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$, resulting in the identification of a variation law of coal combustion characteristics points. **Key words** thermobalance, combustion characteristic points

内循环流化床颗粒功力特性的研究 = **A Study of the Dynamic Characteristics of Inner-circulating Fluidized Bed Particles** [刊, 中] / Lu Chumei, Xu Yansheng (Shandong University of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, - 1997, 12(5). - 335- 338

This paper presents the results of an experimental study on the dynamic characteristics of particles in a V type inner-circulating fluidized bed, including the kinematic trajectory of the particle inner circulation, the distribution feature of the bed layer inner pressure and fluidization speed, etc. **Key words** inner circulation fluidized bed, dynamic characteristics, fluidization speed

高浓度煤粉燃烧过程中氮氧化物生成的研究 = **An Investigation of NO_x formation Resulting from the Burning of High-concentration Pulverized Coal** [刊, 中] / Qi Hong, Fan Yaoguo, Yuan Jianwei (Huazhong University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(5). - 339- 344

NO_x emissions were measured during the process of pulverized coal burning with the formation and disassociation of NO_x undergoing a chemico-dynamics simulation. The simulation results show that the major cause of the significant decrease in NO_x emissions during the combustion of high-concentration pulverized coal consists in a combustion deviating from the stoichiometric ratio. The disassociation action on NO_x of a huge amount of CO produced under a uniform phase ignition mode can be explained as the second cause. **Key words** high-concentration pulverized coal, coal combustion, NO_x, CO

立式上锅筒实际液位计算方法的探讨 = **An Exploratory Investigation of the Method for Evaluating Actual Water Levels in Vertical Steam Drums** [刊, 中] / Zou Xiang, Wang Liangyan (Guangzhou Energy Resources Research Institute under the Chinese Academy of Sciences) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(5). - 345- 347

An analysis and discussion is given of the bubbling process in the case of underwater admission of steam-water mixture. Two kinds of methods for evaluating average section volumetric quality are compared with a calculation formula given, which facilitates the computation of actual water levels. The difference between an actual water level and a weight water level is dependent on the steam drum steam output and operating pressure. In the case of a medium and low-pressure range and a constant steam output a moderate increase in operating pressure can lead to an increase in actual gravity separation height, thereby enhancing the effectiveness of natural separation. Under certain circumstances the difference between the maximum water level and an average water level should not be taken lightly or disregarded. **Key words** vertical steam drum, water level, volumetric quality, evaluation

贾汪 PFBL-CC中试电站异形煤仓设计和试验 = **Design and Test of an Irregular-shaped Coal Bin for Jiawang PFBC-CC intermediary Test Power Station** [刊, 中] / Yang Yaping (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(5). - 348- 350

With the help of Jike's design method of mass flow hopper bins some special issues in the design of hopper bins are analysed with a simplified treatment being proposed. A Study is conducted of the shape selection which can produce a mass flow in an irregular-shaped coal particle hopper bin. In addition, a model test has been conducted to verify the accuracy of the results. **Key words** coal bin, hopper bin, mass flow, slope, inner-flow valley