

高密度循环流化床出口结构对床内流动特性的影响

樊保国 张建帅 乔晓磊 金 燕

(太原理工大学 电气与动力工程学院 山西 太原 030024)

摘 要: 在 $\phi 0.205\text{ m} \times 7\text{ m}$ 高密度循环流化床冷态实验台上, 对 3 种出口结构(C 型光滑出口、L 型和 T 型突变出口)在不同循环流率和不同表观气速下分别对主床轴向颗粒浓度分布的影响进行研究。高密度循环的研究主要针对 C 型出口, 最大循环流率 G_s 为 $220\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 底部 3 m 以下区域颗粒浓度大于 0.1 进行的。实验结果表明: C 型出口使床内颗粒浓度呈现指数衰减规律; L 型、T 型出口效应对整个床高轴向颗粒浓度分布均有影响, T 型出口增浓效果高于 L 型, 且离出口中心线 2 m 区域出现局部增浓现象。

关 键 词: 高密度循环流化床; 循环流率; 出口结构; 颗粒浓度; 流动特性

中图分类号: TQ051 文献标识码: A

引 言

高密度循环流化床的固体循环流率(G_s)超过 $200\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 固体颗粒浓度(ε_s)大于 0.1, 其床内的气固流动特性极其复杂, 而出口结构是影响床内流动特性的重要因素之一。近些年, 不少国内外学者对循环流化床出口结构进行了研究^[1-4]。文献[5]通过不同循环流化床出口结构试验发现, 当采用光滑出口结构时, 由于其导流作用, 出口附近床密度没有增加; 当采用突变结构时, 由于空腔效应和碰撞效应, 顶部出口区域床密度明显增加。文献[6]对不同的出口结构, 分别在直径为 0.1 和 0.2 m 的主床上进行试验, 发现只要颗粒终端速度达到要求和主床直径足够大, 出口结构效应影响范围可从出口延伸至整个高度的主床。文献[7]对方形截面循环流化床试验, 发现突变结构可明显增加床内颗粒的停留时间。文献[8]在方形截面密相床上对光滑出口和 T 型出口进行试验, 发现 T 型出口的约束效

应使出口附近产生了一个颗粒增浓的区域, 且在相同的实验条件下, 床内颗粒浓度整体高于光滑出口下的浓度。上述研究均表明, 出口结构对循环流化床床内气固流动特性的影响, 大多是在较低循环流率下进行的, 对高循环流率研究相对较少。而对于高密度循环流化床, 出口结构对床内气固流动特性可能产生更大的影响, 甚至成为能否达到高密度操作的决定性因素。本研究在高密度循环流化床条件下分别对 C 型光滑出口、L 型和 T 型突变出口进行了试验, 研究了 3 种典型出口结构对高密度循环流化床床内气固流动特性的影响。

1 试验系统

1.1 系统组成

试验系统如图 1 所示, 主要由送风系统, 主床, 物料循环系统, 压力、温度、差压、风量和循环流率测量系统组成。其中, 主床内径为 0.205 m, 有效高度为 7 m。在主床不同高度安装有机玻璃管制成的视窗, 可以直观地了解床内物料流动状态。储料罐内储存物料, 以保证运行参数变化时立管料封作用不被破坏。罗茨风机为主床供风, 主床风通过风帽式布风板进入主床, 主床内物料在气体的夹带作用下被提升, 在顶端出口进入旋风分离器, 实现气固分离。分离的物料落入立管, 再通过 U 型返料阀返回主床, 从而实现物料循环。旋风分离器未分离出的细小颗粒在引风机的作用下进入布袋除尘器, 除尘后的气体最终排入大气。

1.2 物料特性

试验系统的床料为石英砂, 其平均粒径为 340

收稿日期: 2013-01-17; 修订日期: 2013-02-03

基金项目: 山西省高等学校科技项目(20090009)

作者简介: 樊保国(1962-), 男, 山西洪洞人, 太原理工大学副教授。

μm 堆积密度为 $1\,490\text{ kg/m}^3$,颗粒密度为 $2\,630\text{ kg/m}^3$,临界流化风速为 0.09 m/s ,颗粒终端速度为 2.14 m/s 。

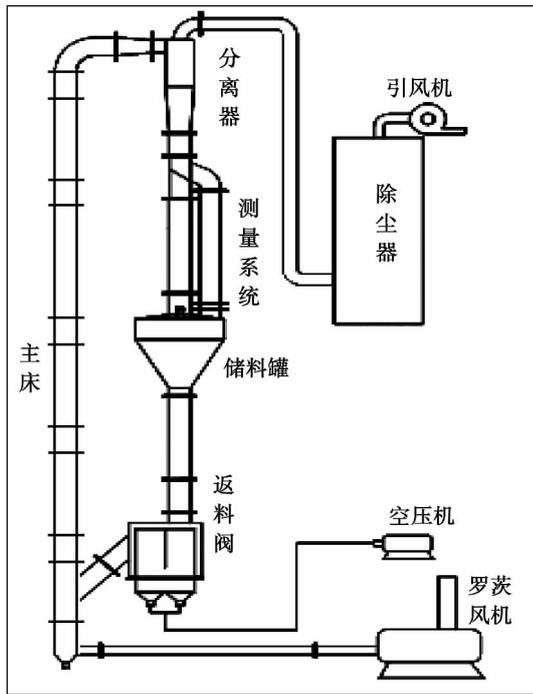


图 1 试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test system

1.3 参数测量

主床供风管道安装涡街流量计 ,测量进入主床风量 ,同时在供风管道设置温度、压力测量点 ,用来修正涡街流量计数值。返料风管道安装转子流量计 ,测量返料风量。主床总风量等于修正后的涡街流量计数值与返料风量数值之和。

主床不同高度设置 13 个测压孔 ,利用差压传感器测量每相邻两孔之间的差压 ,并可计算出表观颗粒浓度 ,即:

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta p}{\rho_p g \Delta h} \quad (1)$$

式中: ΔP —相邻两测压点压差 ,Pa; ρ_p —颗粒密度 , kg/m^3 ; Δh —两相邻测压点高度 ,m; g —重力加速度 , m/s^2 。

循环流率测量装置安装在旋风分离器下方 ,当工况稳定后 ,转动翻板使物料落入旁路 ,测量一定时间内(大于 5 s)的物料堆积高度 ,即可计算出循环流率(取 3 次以上平均值)。

1.4 实验方案

分别对图 2 所示的 3 种典型出口结构在不同循环流率和不同表观气速下进行试验。在每种出口结构下 ,通过调节返料风量来改变循环流率的大小 ,调节进入主床的气体流量来改变表观气速(U_g)。由于系统所采用的罗茨风机为定容风机 ,所以安装了旁路电动阀方式进行风量调节 ,并通过专门设计的控制系统进行自动调节 ,其调节原理如图 3 所示。

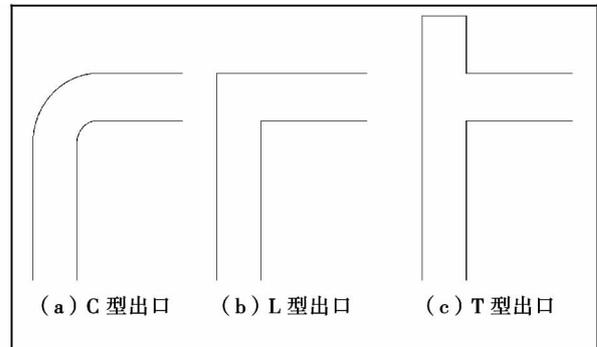


图 2 主床出口结构

Fig. 2 Outlet structure of the main bed

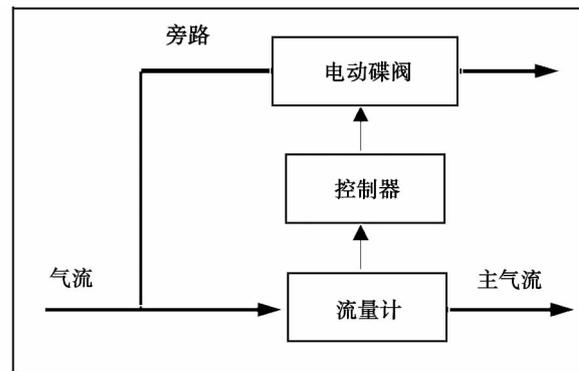


图 3 风量控制流程图

Fig. 3 Diagram for showing the flow path of the air flow control

1.5 数据采集

利用 LabVIEW 软件编制了数据采集程序 ,显示所测参数的实时数值及随时间变化趋势。图 4 为程序采集所得到的风室压力和主床压降趋势图 ,其中主床压降为各差压传感器累计压降。从图中可看出 ,风室压力和床压降波动均比较稳定 ,且二者波动趋势基本相同。因此 ,可以认为采集的数据是客观真实的。

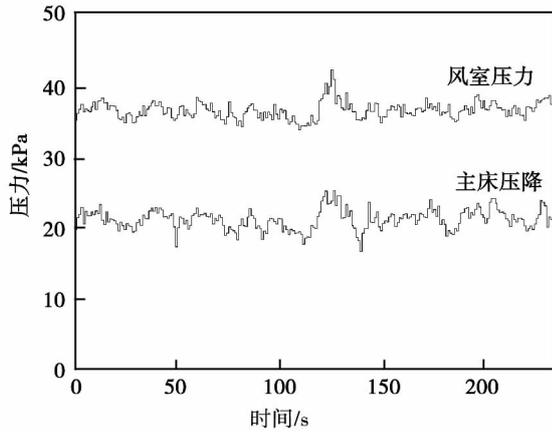


图 4 风室压力和主床压降趋势图

Fig. 4 Chart for showing the tendency of the pressure in the air chamber and the pressure drop in the main bed

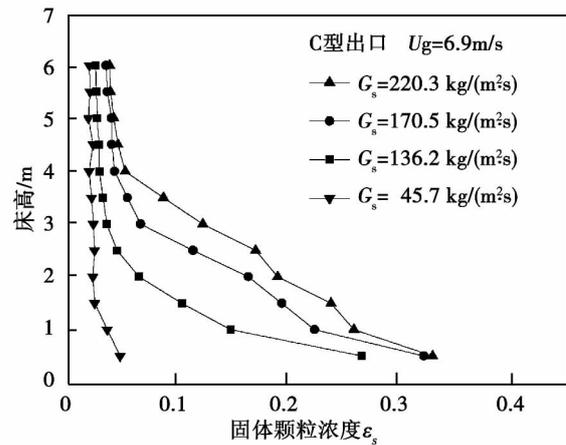


图 5 C 型出口颗粒浓度和床高随循环流率的变化关系

Fig. 5 Variations of the particle concentration with the circulating flow rate under the condition of C type outlet

2 结果与分析

2.1 颗粒浓度随循环流率变化关系

图 5 为在 C 型出口下表观气速为 6.9 m/s 时, 颗粒浓度随颗粒循环流率变化的关系。由图看出, 颗粒浓度沿床高呈明显下浓上稀的典型指数衰减规律。随着循环流率的增加, 整个床的颗粒浓度均增加。主床底部由于返料口原因, 颗粒之间相互剧烈碰撞, 且颗粒处于加速阶段, 上升速度较慢, 导致浓度较大。在循环流率超过 200 kg/(m²·s) 时, 主床 3 m 以下区域颗粒浓度均大于 0.1, 实现了高密度循环。

图 6 为 L 型出口结构下主床颗粒浓度随循环流率改变时的关系。从图中可以看出, 颗粒浓度为下部浓、中间稀、顶部浓分布, 在离出口中心线 2 m 区域, 颗粒浓度出现局部较浓现象, 且离顶部越近浓度有稍微降低趋势。可以得出, 对于 L 型出口, 上升颗粒一部分随气体离开主床进入旋风分离器, 另一部分碰撞顶部后沿壁下落, 出现返混, 主床顶部颗粒浓度增加。下落的大部分颗粒可能在离出口中心线 2 m 区域与上升的颗粒发生碰撞而反折向上运动, 大量颗粒在此团聚, 导致此区域颗粒浓度明显增加。

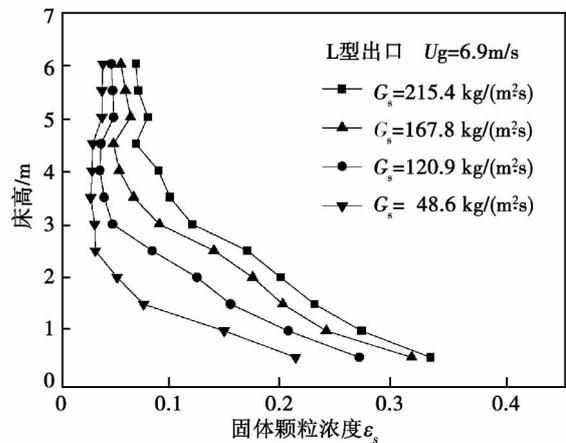


图 6 L 型出口颗粒浓度和床高随循环流率的变化关系

Fig. 6 Variations of the particle concentration with the circulating flow rate under the condition of L type outlet

图 7 为 T 型出口下颗粒浓度随循环流率改变时的关系。从图中可看出, 在 T 型出口结构下, 同样在离出口中心线 2 m 区域有明显的增浓现象。与 L 型出口不同, 在循环流率较低时, 离出口中心线 2 m 区域颗粒浓度出现了局部较浓现象, 且离顶部越近浓度有稍微降低趋势。随着循环流率的增加, 离出口中心线 2 m 区域颗粒浓度明显增浓, 且离顶部越近颗粒浓度越大。这主要是由于 T 型出口顶部形

成空腔,未被气流直接带出主床的颗粒,在惯性作用下进入空腔,由于重力作用,颗粒的动能转化为势能,颗粒在空腔内易于团聚,再由于边壁作用,颗粒沿边壁下降,致使顶部颗粒浓度增大。在循环流率较低时,与 L 型结构相似,下落的大部分颗粒在离出口中心线 2 m 区域与上升的颗粒发生碰撞而返折向上运动,致使此区域颗粒浓度较大。随着循环流率增加,床内颗粒浓度增加,从顶部下落的颗粒还未下降到离出口中心线 2 m 区域,已与上升颗粒发生碰撞而返折向上运动,因此出现离顶部越近颗粒浓度越浓现象。

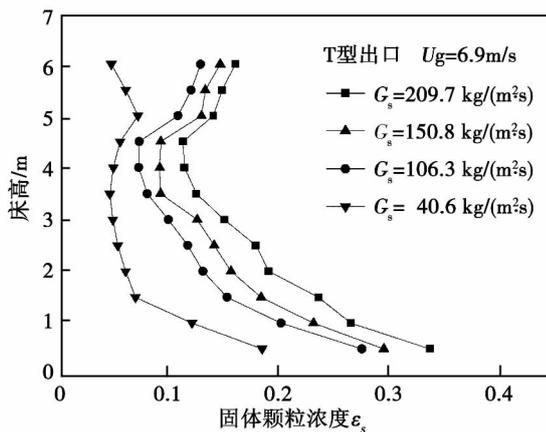


图 7 T 型出口颗粒浓度和床高随循环流率的变化关系

Fig. 7 Variations of the particle concentration with the circulating flow rate under the condition of T type outlet

2.2 表观气速对颗粒浓度的影响

图 8 ~ 图 10 分别为 C 型、L 型和 T 型 3 种出口结构在相近循环流率不同表观气速下颗粒浓度的分布情况。从图中可以看出,随着表观气速升高,床内颗粒浓度反而降低。这主要是由于随着表观气速减小,颗粒在床内上升速度降低,从而增加了床内物料的停留时间,导致床内颗粒浓度增加。同样,在 L 型、T 型出口各表观气速下,离出口中心线 2 m 区域均出现明显增浓现象。

2.3 出口结构对床内颗粒浓度的影响

图 11 为相同表观气速相近循环流率下 3 种不同出口结构的颗粒浓度的分布。从图中可知,C 型出口呈典型的指数衰减规律,T 型、L 型突变出口呈现顶部浓、中间稀、底部浓分布。L 型、T 型出口在

顶部颗粒浓度增加比较明显,且 T 型增浓效果高于 L 型出口。这主要是由于突变出口使上升的颗粒在碰撞效应和空腔效应下,沿边壁下落发生返混,且下落的大部分颗粒在离出口中心线 2 m 区域与上升颗粒发生碰撞返折向上运动,而在此区域颗粒浓度开始明显增加。从图中还可以看出,突变出口使整个高度的主床颗粒浓度均有增加,且 T 型增浓效果明显高于 L 型。这说明出口结构效应从出口区域延伸至整个主床高度,且结构不同影响程度不同。

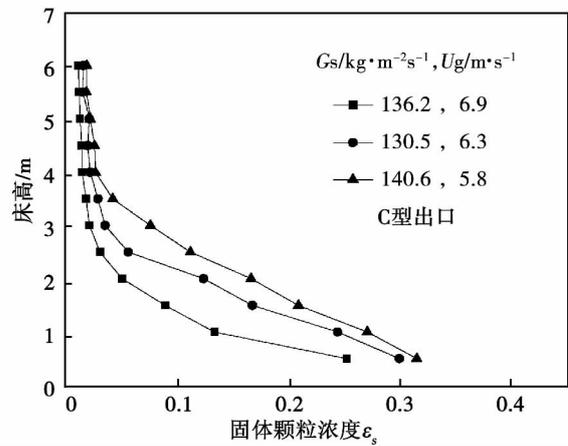


图 8 C 型出口相近循环流率下颗粒浓度和床高随表观气速的变化关系

Fig. 8 Variations of the particle concentration with the apparent air speed at approximate circulating flow rates under the condition of C - type outlet

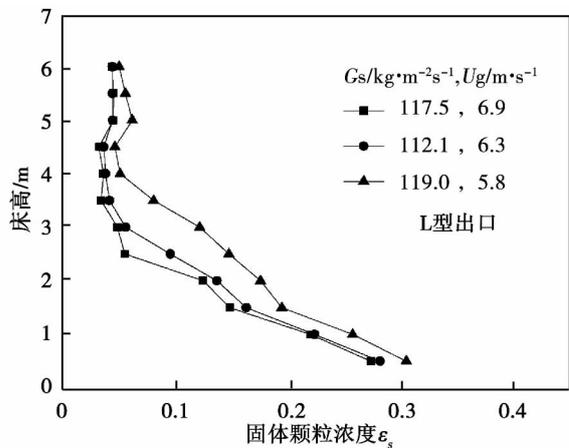


图 9 L 型出口相近循环流率下颗粒浓度和床高随表观气速的变化关系

Fig. 9 Variations of the particle concentration with the apparent air speed at approximate circulating flow rates under the condition of L - type outlet

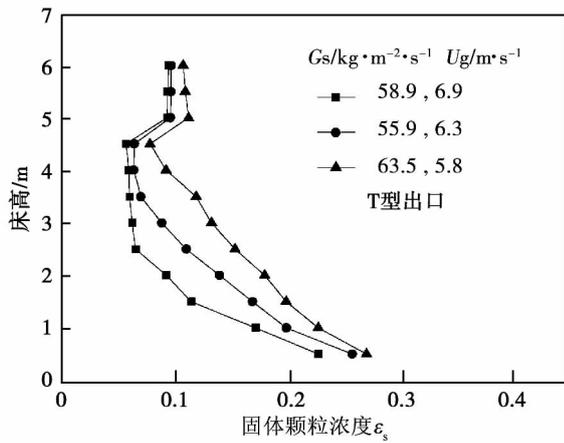


图 10 T 型出口相近循环流率下颗粒浓度和床高随表观风速的变化关系

Fig. 10 Variations of the particle concentration with the apparent air speed at approximate circulating flow rate under the condition of T - type outlet

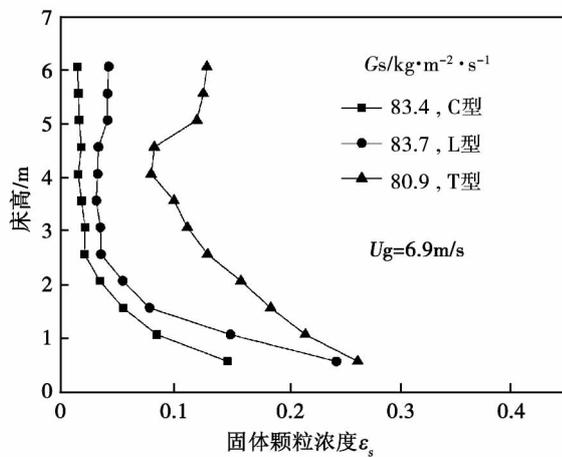


图 11 相近循环流率相同表观风速下颗粒浓度和床高随出口结构的变化关系

Fig. 11 Variations of the particle concentration with the outlet structure at an approximate circulating flow rate and an identical apparent air speed

3 结 论

高密度循环流化床不同的出口结构使床内颗粒浓度呈现不同分布,在本试验条件下,得出以下结论:

(1) C 型光滑出口由于导流的作用,颗粒浓度呈现下浓上稀的指数分布,且在循环流量超过 200

kg/m²s 时,主床 3 m 以下区域颗粒浓度均大于 0.1。

(2) T 型、L 型突变出口使床内颗粒浓度均出现顶部浓、中间稀、底部浓分布,且在离出口中心线 2 m 区域出现局部增浓现象。

(3) 在同样的试验条件下,T 型、L 型出口使整个床高的颗粒浓度均增加,且 T 型增浓效果高于 L 型。

(4) 颗粒浓度轴向不均匀性随着循环流率增加而增加,随表观风速升高而降低。

参考文献:

[1] Grace J R ,Issangya A S ,Bai D R ,et al. Situating the high-density circulating fluidized bed [J]. AICHE J ,1999 ,45 (10) : 2108 -2116.

[2] Issangya A S ,Bai D ,Bi H T ,et al. Suspension densities in a high-density circulating fluidized bed riser [J]. Chem Eng Sci ,1999 ,54 (22) : 5451 - 5460.

[3] Kim S W ,Kirbas G ,Bi H T ,Lim C J ,Grace J R. F-low behavior and regime transition in a high-den-sity circulation fluidized bed riser [J]. Chem Eng Sci 2004 ,59(18) : 3955 - 3963.

[4] 王圣典,王雪瑶,赵凯等.高密度循环流化床不同界面结构提升管内流动特性研究[J].中国电机工程学报,2011 ,31 (23) : 8 - 12.

WANG Sheng-dian ,WANG Xue-yao ZHAO Kai ,et al. Study of the flow characteristics of the risers with various interface structures in a high density circulating fluidized bed [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2011 ,31(23) : 8 - 12.

[5] 金燕,郑洽余.出口几何结构对循环流化床锅炉性能影响的试验研究[J].工程热物理学报,1999 ,20(1) : 129 - 132.

JIN Yan ,ZHENG Qia-yu. Experimental study of the influence of the outlet geometric structure on the performance of a circulating fluidized bed boiler [J]. Journal of Engineering Thermophysics , 1999 ,20(1) : 129 - 132.

[6] Pugsley T ,Lapointe D ,Hirschberg B ,et al. Exit effects in circulating fluidized bed risers [J]. Can J Chem Eng ,1997 ,75: 1001 - 1010.

[7] Harris A T ,Davidson J F ,Thorpe R B. The influence of the riser exit on the particle residence time distribution a circulating fluidized bed riser [J]. Chem Eng Sci 2003 ,58: 3669 - 3680.

[8] 廖良良,樊保国,徐祥等.方形截面循环流化床出口效应的实验研究[J].煤炭转化,2008 ,7(3) : 14 - 17.

LIAO Liang-liang ,FAN Bao-guo ,XU Xiong ,et al. Experimental study of the outlet effect of a circulating fluidized bed with a square section [J]. Coal Conversion 2008 ,7(3) : 14 - 17.

(丛 敏 编辑)

impingement flow. Under the condition of a same material adding speed ,a single nozzle material addition and dual nozzle material addition have no obvious influence on the overall heat and mass transfer effectiveness(drying performance) and to increase the spacing between nozzles can be favorable to the heat and mass transfer process inside the impingement flow. **Key words:** impingement flow , heat and mass transfer , intensified mechanism , temperature difference

高密度循环流化床出口结构对床内流动特性的影响 = **Influence of the Outlet Structure of a High Density Circulating Fluidized Bed on the Flow Characteristics Inside the Bed** [刊 ,汉] FAN Bao-guo ,ZHANG Jian-shuai ,QIAO Xiao-lei et al(College of Electrical and Power Engineering ,Taiyuan University of Science and Technology ,Taiyuan ,China ,Post Code: 030024) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(5) . -487 ~ 491

On a $\phi 0.205 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ high density circulating fluidized bed cold-state test rig ,studied was the influence of three types of outlet structure(C type smooth outlet ,L type and T type abrupt change outlet) on the main bed axial particle concentration distribution under different circulating flow rates and apparent air speeds respectively. The high density circulation research work was mainly performed on the C type outlet with the maximum circulating flow rate G_s being $220 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ and the particle concentration in the area of the bottom below 3 m being greater than 0.1. The test results show that the C type outlet can make the particle concentration inside the bed assume an exponential attenuation law and the L and T type outlet can both exercise their influence on the axial particle concentration distribution in the whole bed height. The concentration enhancement effectiveness of the T type outlet is better than that of L type and a local concentration enhancement phenomenon emerges in the zone 2 meters away from the centerline of the outlet. **Key words:** high density circulating fluidized bed ,circulating flow rate ,outlet structure , particle concentration

基于 EKF 技术的 CFB 锅炉残碳量估计 = **Application of the Extended Kalman Filtering Technology in the Estimation of the Residual Carbon Content of a CFB Boiler** [刊 ,汉] GAO Ming-ming ,LIU Ji-zhen ,NIU Yu-guang(Beijing City Key Laboratory on Industrial Process Measurement and Control Innovative Technologies and Systems ,National Key Laboratory on New Energy Source Electric Power Systems ,North China University of Electric Power ,Beijing ,China ,Post Code: 102206) ,WU Yu-ping(Sichuan Baima Circulating Fluidized Bed Demonstration Power Plant Co. Ltd. ,Neijiang ,China ,Post Code: 641000) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(5) . -492 ~ 496