

烟气脱硫循环流化床内气固流动的 PDA 试验研究

董 勇¹, 马春元¹, 秦裕琨²

(1. 山东大学 能源与动力工程学院, 山东 济南 250061;

2. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 提出了由两级分离系统组成的循环流化床烟气脱硫工艺。用粒子动态分析仪(PDA)对床内不同高度方向上颗粒横向、轴向速度、颗粒粒径及浓度分布进行了测量, 得到了床内气固流动的瞬时脉动特性以及总体气固流动行为, 试验结果为烟气脱硫新工艺的结构设计及优化提供了依据。

关 键 词: 烟气脱硫; 循环流化床; PDA; 气固流动

中图分类号: X701.3 文献标识码: A

1 引 言

半干法烟气脱硫技术在典型的喷雾干燥条件下运行, 由 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和稀释水组成的浆液雾化到反应器内, 在反应器内热烟气悬浮、干燥、输送吸收剂, 同时脱除烟气中的二氧化硫气体。半干法烟气脱硫技术与湿法烟气脱硫技术相比, 其显著特点是初始投资低, 适合中小锅炉机组新上脱硫装置以及已有机组烟气脱硫改造。目前, 我国烟气脱硫技术政策规定中小电站机组($\leq 200 \text{ MW}$)的烟气脱硫工艺优先采用投资较低的半干法烟气脱硫工艺。与湿法脱硫工艺相比, 现有半干法烟气脱硫工艺的脱硫效率和脱硫剂利用率偏低, 并造成脱硫剂的浪费。

为了开发新型半干法烟气脱硫工艺, 本文提出了由两级分离系统组成的双循环流化床烟气脱硫装置。其主要特征为, 流化装置为一单管文丘里结构, 没有传统流化床的布风板及风帽, 在流化床上方布置了一级惯性分离器, 分离下的脱硫灰由重力直接送至床内, 实现了脱硫产物的内循环; 经一级分离器分离后的烟气进入二级下排气旋风分离器, 分离下的脱硫产物由流化床外部输送至床内, 构成脱硫灰的外循环^[1]。一级分离器提高脱硫灰的总体分离性能, 同时内循环又直接将脱硫灰送至床内, 节省输送动力。为了研究双循环条件下床内的气固流动特性, 建立了循环流化床冷态PDA试验台, 对床内的

气固流动规律进行了试验研究, 为烟气脱硫新工艺的研究开发提供了依据。

2 试验装置及测量方法

2.1 试验装置

试验装置如图 1 所示, 它主要有入口段、测量段、一级分离器、下排气旋风分离器、给料装置、调节风门、引风机和布袋除尘器等组成。

试验装置中, 入口段直径为 120 mm 的单管文丘里结构, 测量段截面为 220 mm \times 220 mm, 高为 1 800 mm。为了 PDA 测量需要, 测量段三面为平面玻璃, 以便 PDA 的前向接受。

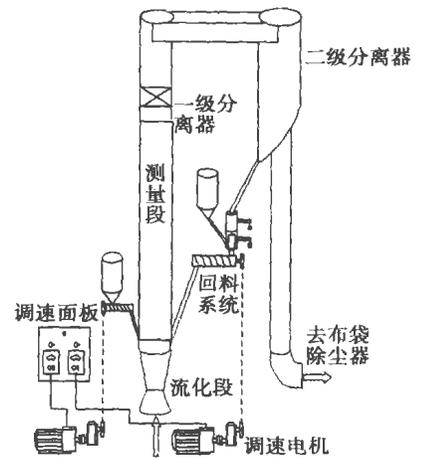


图 1 PDA 冷态试验系统图

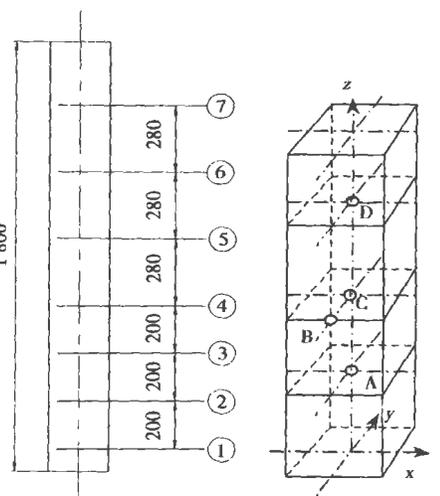


图 2 测量截面示意图

试验中为了保持塔内合适的灰浓度和粒度,设置了两台调速给料装置。一台给料机设在文丘里入口段上方,其给料粒度为325目玻璃微球。另一回料装置把旋风分离器分离下的部分玻璃微珠以一定速度输送至塔内,以模拟塔内真实粒度分布,分离下的剩余物料送至贮灰罐,以备再用。

2.2 测量系统

测试系统采用丹麦Dantec公司生产的三维激光粒子动态分析仪(PDA),它是一种非接触的测量方式,是当今测量颗粒动态特性的最先进工具之一。它可以在不干扰流场的基础上,同时采集气固两相速度和颗粒粒径信号,进而可以分析出时间、空间内的颗粒浓度分布、两相滑移速度、脉动速度和湍动能分布等。它主要由激光光源、光纤驱动器、发射器、接收器、信号处理器以及三维自动坐标架等组成。

2.3 测点的选取

在整个测量段从下到上选取了7个测量面,如图2所示。为了避免入口段灰的回送带来的不均匀影响太大,第一个测量截面与喷口隔开了一定距离。在这7个测量截面中,下面4个截面的距离为200 mm,上面3个测量截面距离为280 mm。这样选取的目的是下部的区域床内变化幅度较大,测量截面设置密一些,随着流动趋于稳定,上部的测量截面距离相应增加。考虑到床内流场的对称性,在每个测量截面上沿半径方向上设置了11个测点,测点之间距离为11 mm。

2.4 测量方法

试验物料为平均直径 $45\ \mu\text{m}$ 、密度 $2\ 300\ \text{kg}/\text{m}^3$ 的玻璃珠。在试验中,具体到每个测点的测量时限一般是设定测量到的粒子总数量或设定测量点的测量时间,如果满足两个标准中的一个,则PDA在此点的测量即结束。本试验中,设定为2000个粒子和10 s。试验中, $0\sim 5\ \mu\text{m}$ 的玻璃微珠代表气相运动;大于 $5\ \mu\text{m}$ 的玻璃微珠代表固体粒子。

3 试验结果及分析

3.1 瞬时变化特性

图3分别为循环流化床内4点(A: $x/D=0, y/D=0, z/H=0.2$; B: $x/D=0, y/D=-0.5, z/H=0.5$; C: $x/D=0, y/D=0, z/H=0.5$; D: $x/D=0, y/D=0, z/H=0.85$ 。其中:测点A、C和D分别为中心线上沿流动方向不同高度的3点,B和C两点在同一测量截面上,B点为壁面处测点)的轴向速度、横向速度和颗粒粒径的测量结果,图中实线为其平均值。通过分析测量时限内每个粒子的运动行为,可以得到流化床的瞬时变化特性。

3.1.1 颗粒速度

如图4所示,分别为A、B、C和D4点的轴向颗粒

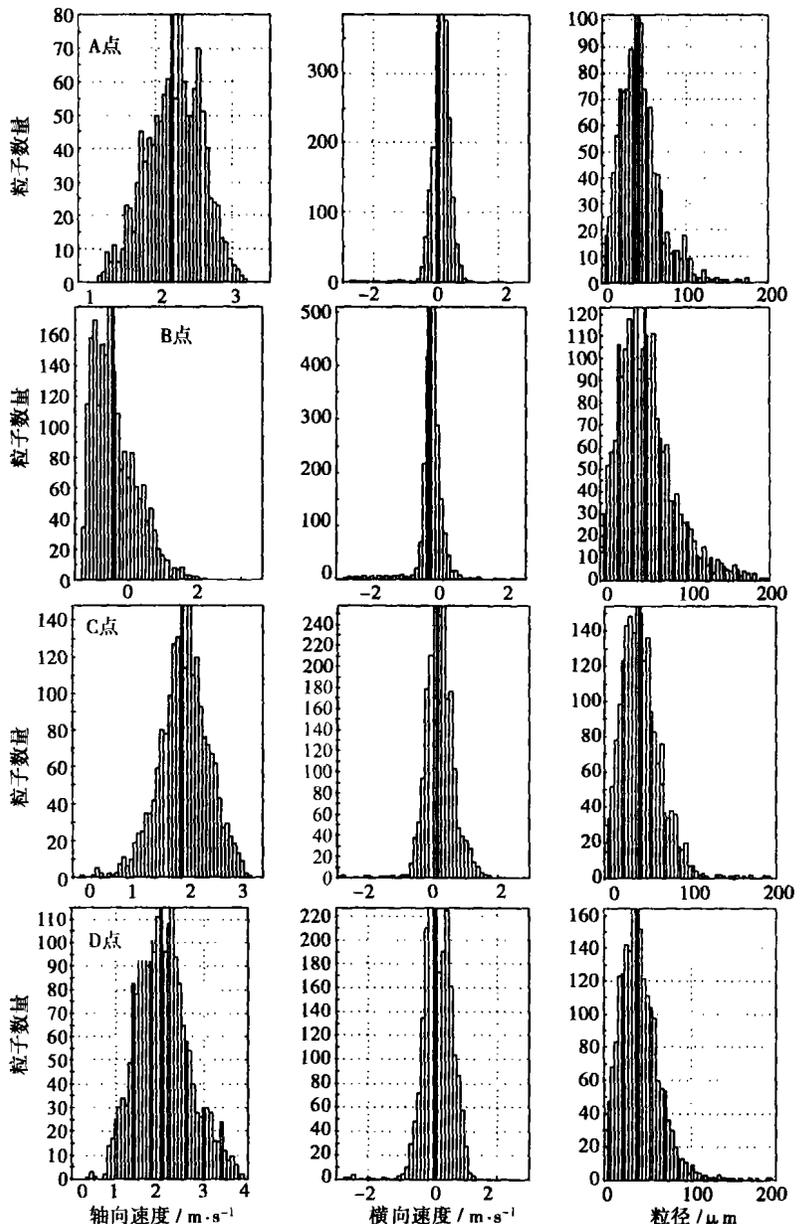


图3 A~D点速度及粒径分布

粒速度的瞬时变化情况。这些结果表明,流化床内颗粒相存在剧烈的波动,表现为床内颗粒表现各异。无论哪个区域的颗粒,其速度范围很宽,速度有大有小,有正有负。在中心区域颗粒轴向速度大于表观气体速度,壁面区域的颗粒轴向速度小于表观气体速度,而且存在向下运动的颗粒。

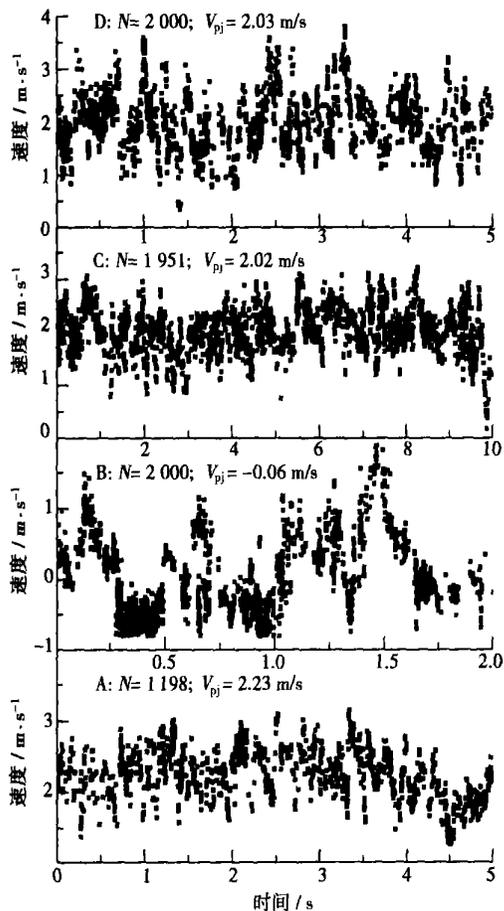


图 4 颗粒轴向速度的瞬时变化

在给定的某点,流化床中的气固流动呈现出大量颗粒随时间的脉动^[2]。这种现象与试验中所观察到的流动景象是一致的。在流化床内,观察到流动结构随时间和空间呈不稳定状态,运动呈现“此起彼伏”的景象。

横向速度分布规律跟轴向速度分布很类似。当横向速度接近零时,只有很少一部分颗粒的横向速度分量接近零。事实上,瞬时扰动的特征表现为大量颗粒在很低的平均速度周围的脉动,这种脉动是很剧烈的,如图 5 所示 A 点颗粒横向速度的瞬时变化情况,尽管平均速度为 0.11 m/s,其脉动速度范围高达 -3 ~ 1 m/s。

3.1.2 颗粒大小——速度关联

由 PDA 测量结果可以给出某测量点的颗粒大小与其速度关联式,图 6 给出了 A 点在测量时限内所有颗粒的粒径与其速度的关联分布情况。可见,一定粒度的颗粒可以出现在所有的速度测量范围之内,反过来每个固定速度值覆盖了物料范围内所有不同大小的粒子。颗粒大小与速度的关联表现了颗粒群的特点,展示了循环流化床内高度湍流特性。

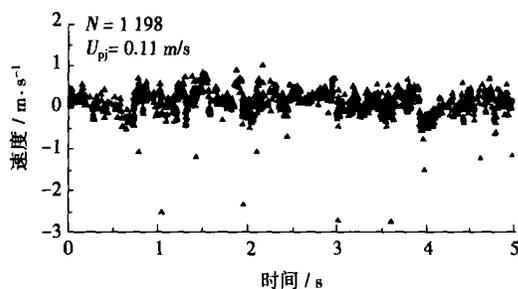


图 5 A 点颗粒横向速度的瞬时变化

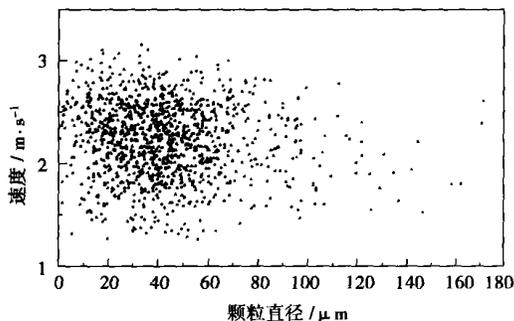


图 6 A 点颗粒直径与速度关联

3.2 平均速度分布

3.2.1 轴向平均速度分布

图 7 给出了沿流化床不同高度上气体和颗粒平均轴向速度分布。由图 6 可见,在流化床内流动的中心区域和靠近壁面的区域表现出了截然不同的流动行为。在流动中心区域的速度为正,朝壁面区域移动,速度呈下降趋势,到某个圆环处,表现出剧烈的轴向速度梯度——平均轴向速度快速降低,通过零点并变为负值,这个区域占反应器截面半径 10% ~ 20% 的区域,这个区域的颗粒向反应器的下部运动。

同时,由于气一固相互作用和相互影响,气相的运动行为跟固体运动行为极其相似,而且气固滑移

速度很小。随着高度增加, 循环流化床速度分布变得更平坦, 中心的平均速度数值下降。

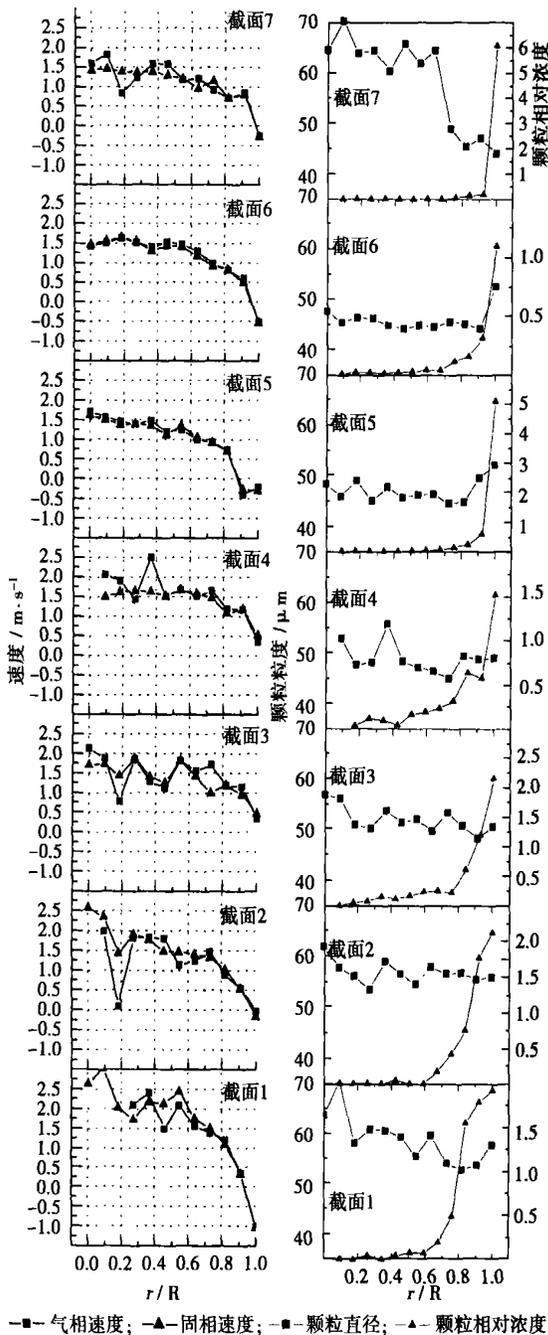


图 7 轴向平均速度分布 图 8 粒径及相对浓度分布

3.2.2 横向平均速度分布

试验表明, 颗粒向壁面运动的速度值很低, 靠近壁面处增大, 并达到最大值。但随着高度变化趋势不明显。不同工况的试验表明, 随表观气体速度的增大颗粒横向平均速度增大。试验还表明, 与轴向速度相比, 横向速度分量可以忽略不计。

3.3 颗粒浓度与粒度分布

图 8 给出了高度方向上不同横截面的平均颗粒粒度及相对颗粒浓度分布。由图中可见, 在给定高度, 由流动中心到壁面平均颗粒直径稍微下降, 这一点可能与气体速度分布有关, 因为较大的速度携带的颗粒直径也相应大些, 这种变化与文献[3] 得到的沿横向下下降速度为 $0.4 \mu\text{m}/\text{cm}$ 的结论相类似。这种下降趋势一直持续到中心区域和壁面环面的边界层区域, 在环面区域, 平均颗粒直径又呈增大趋势。

为了表达方便, 图中采用了相对颗粒浓度的概念, 其定义为某点的颗粒浓度与入口平均颗粒浓度之比。由图中可见, 颗粒浓度分布呈现中心区域浓度低, 壁面浓度高的特点。同时结合前述的速度分布, 可以得到烟气循环流化床的总体流动行为: 在中心区域颗粒被高速气体夹带向上, 并向壁面以相对较低的速度移动; 在流化床的壁面区域, 气固两相缓慢地向下运动, 这种循环流动有利于气固接触及脱硫剂的循环利用。

在流化床中, 由于上部区域有分离器, 分离下的颗粒直接回到床内, 使得上部的颗粒浓度也较大, 这一点有别于普通流化床具有分明稀相区和密相区的特点。

4 结 论

(1) 烟气脱硫循环流化床内颗粒相存在剧烈的波动, 床内颗粒表现各相异性。在中心区域颗粒轴向速度大于表观气体速度, 壁面区域的颗粒轴向速度小于表观气体速度, 且存在向下运动的颗粒。在给定的某点, 流化床中的气固流动呈现出大量颗粒随时间的脉动。

(2) 在流化床中心区域颗粒被高速气体夹带向上, 并向壁面以相对较低的速度移动; 在流化床的壁面区域, 气固两相缓慢地向下运动。

(3) 颗粒浓度分布呈现中心区域浓度低, 壁面浓度高的特点。

参考文献:

[1] 董 勇, 马春元, 徐夕仁, 等. 双循环流化床烟气悬浮脱硫工艺 [J]. 电站系统工程, 2002, 18(6): 9-10.
 [2] MOORTELT V, AZARIO E, SANFINI R. Experimental analysis of the gas-particle flow in a circulating fluidized bed using a phase doppler particle analyzer [J]. *Chemical Engineering Science*, 1998, 53 (10): 1883-1899.
 [3] ZHANG Y F, ARASTOOR H. Dilute fluidized cracking catalyst particles-gas behavior in the riser of a circulating fluidized bed [J]. *Powder Technology*, 1995 84: 221-229.

燃煤锅炉再燃技术中再燃燃料的特性与选择 = **The Characteristics and Selection of Reburned Fuels Involved in the Reburning Technology of a Coal-fired Boiler** [刊, 汉] / FANG Bing, LUO Yong-hao, LU Fang, et al (Thermal Energy Engineering Research Institute of Mechanical and Power Engineering College under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 443 ~ 446

Reburning reaction mechanism and characteristics are discussed regarding the use of a variety of reburned fuels in the reburning technology of a coal-fired boiler. Such reburned fuels include hydrocarbon gases, oil, coals and biomass, etc. The effectiveness of NO_x reduction of various fuels under specific combustion conditions is analyzed and compared along with a summing-up of the principles to be observed for selecting reburned fuels. **Key words:** combustion, NO_x , reburning, reburned fuel, reduction

高温材料在燃气轮机中的应用和发展 = **Application and Development of High-temperature Alloys for Gas Turbines** [刊, 汉] / XUN Bai-qiu, LI Qi, ZHAO Wu-en (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 447 ~ 449

High-temperature alloy materials represent a very important integral part of the gas turbine materials. They are very widely used to make major components and parts of a gas turbine, such as combustors, guide vanes, rotor blades and turbine discs, etc. The authors have analyzed and explained the main features and new technology of the high-temperature alloys currently used in gas turbines. Moreover, an in-depth and detailed account is given of the research and development status and tendency of these alloys in some developed countries worldwide. **Key words:** gas turbine, high-temperature alloy

烟气脱硫循环流化床内气固流动的 PDA 试验研究 = **Experimental Study of Gas-solid Flows in a Circulating Fluidized Bed of Flue Gas Desulfurization by the Use of a Particle Dynamics Analyzer** [刊, 汉] / Dong Yong, MA Chun-yuan (College of Energy & Power Engineering under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061), QIN Yu-kun (College of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 450 ~ 453

Flue gas desulfurization technology is proposed on the basis of a circulating fluidized bed composed of a two-stage separation system. With the help of a particle dynamics analyzer measurements were taken of particle transverse and axial velocities, particle diameter as well as concentration distribution at different height levels in the bed. As a result, obtained were the momentary pulsation characteristics of the gas-solid flows and overall gas-solid flow behavior in the fluidized bed. These results can provide a solid basis for the structural design and optimization of new technology schemes of a flue gas desulfurization process. **Key words:** flue gas desulfurization, circulating fluidized bed, particle dynamics analyzer, gas-solid flow

CaO 颗粒烟气脱硫反应最佳反应温度的实验研究 = **Experimental Investigation of the Optimum Reaction Temperature of Flue Gas Desulfurization Reaction Involving CaO Particles** [刊, 汉] / WANG Shi-chang, XU Xu-chang, YAO Qiang (Key Laboratory of Thermal Power Engineering and Science Affiliated to the Thermal Engineering Department of Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 454 ~ 457

The desulfurization reaction of flue gases with CaO is subject to a comprehensive influence of the following factors: flue gas composition, reaction temperature and CaO particle inherent characteristics. Through an experimental study and on the basis of summing up the past experience of predecessors it has been proven that the optimum reaction temperature of CaO particles in the circulating fluidized bed of flue gas desulfurization is 800°C . At this temperature it is possible to basically avoid the competitive reaction of such compounds in flue gases as NO , CO_2 , etc with respect to a desulfurization