

方形旋风分离器内气固两相流湍流特性的研究

苏亚欣¹, 岑可法², 骆仲决²

(1. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 200051; 2. 浙江大学 热能工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘 要:应用三维颗粒动态分析仪(3D-PDA)对方形下排气旋风分离器内气固两相流场进行了实验研究,并对流场、脉动速度、颗粒浓度、湍动能、湍流强度等的分布做了讨论。方形旋风分离器的流动具有 Rankine 涡的特点,即中心部分为强制涡区,边壁附近是准自由涡区。边角处因颗粒与壁面间的相互碰撞引起的准层流运动,并使得颗粒湍流脉动强烈,湍流动能和局部湍流强度在边角附近取得较大值,表明此时两相流消耗了气流的能量较多,是造成分离器压力损失的主要区域之一。边角有利于颗粒分离。研究结果为结构优化提供了基础数据,并为今后的数值模拟研究提供了实验对比。

关 键 词:方形下排气分离器; 气固两相湍流运动; 三维颗粒动态分析仪(3D-PDA)

中图分类号: TK224 文献标识码: A

1 前言

分离器是循环流化床锅炉的关键部件之一,对其分离效率和结构优化的研究很受重视^[1-2]。随着循环床锅炉的大型化发展,旋风筒分离器庞大的体积成为一个很大的缺点,很厚的耐火衬料使锅炉的启动缓慢^[3],Foster Wheeler 公司设计的水冷/汽冷分离器虽然可以使耐火材料减薄,大大缩减启动时间^[4],但其水冷受热面结构复杂,制造困难^[5]。因此大型化问题依然不能解决,采用这种结构的分离器的 CFB 锅炉只能达到 350 MW 的水平^[4]。解决的办法有降低旋风分离器的工作温度,采用 450 °C 左右的中温分离器^[6-7]。此外,国内外研究机构研究了其它形式的惯性分离器,如 S 平面流,百叶窗, U 形槽等。国内设计研究了一种方形旋风分离器^[8],它具有较高的分离效率(切割粒径可达 15 μm)^[2],而且它有利于在分离器内壁面安装受热面,对于 CFB 的大型化有积极的意义。

颗粒的分离和分离器内的流场是密切相关的。深入研究分离器内的流动特性对于其结构优化有指

导意义。有关方形下排气分离器内湍流脉动特性的研究尚未见报道,本文将阐述应用三维颗粒动态分析仪(3D-PDA)研究方形下排气分离器流动特性的气固两相湍流脉动的研究结果。

2 实验系统

实验系统如图 1 所示。方形分离器为下排气,在分离器的前侧壁面安装浮法玻璃作为 PDA 测试窗口,流化床为 60 mm×80 mm×1 900 mm 矩形截面的管道,两相流通过流化床段和一水平段进入方形下排气分离器。分离器进口为 20 mm×60 mm,分离器边长 120 mm,筒体高度 180 mm,导流锥和排气管直径均为 60 mm,导流锥高度为 90 mm,导流锥下端距排气管上部 60 mm,分离后的颗粒由料斗收集,被气流携带出的固体颗粒经排气管进入旋风分离器进一步分离,最后经引风机排出室外。PDA 系统包括激光源系统(氩离子激光器,最大输出功率为 5 W,激光功率连续可调)、激光发射系统、接收系统、信号处理系统和微机。实验采用全自动三维坐标架定位,由计算机按输入的坐标进行控制,接收方式为后向式接收。实验中采用的颗粒为 320 目玻璃微珠,平均粒径在 30~40 μm。玻璃珠球形度为 95%,折射率 1.5,密度 2 400 kg/m³。实验中,每个测点采样 5 000 个,限时 1 min。

3 结果分析和讨论

对不同工况下分离器内的流场进行了 PDA 测试,本文讨论一个典型工况——分离器进口处平均风速 20 m/s,分离器进口处平均颗粒浓度 0.343 kg/m³下的结果。

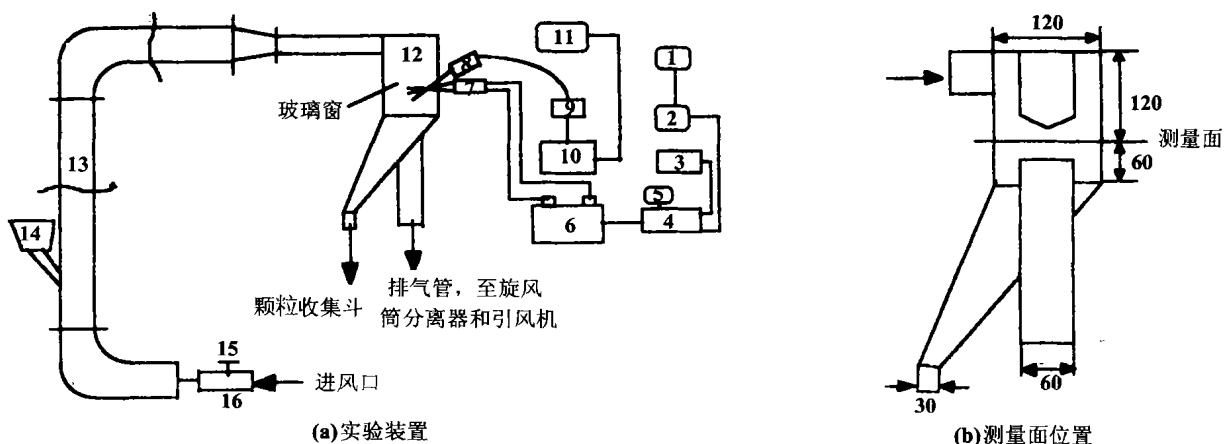
3.1 流场矢量分布

收稿日期: 2001-02-26

基金项目: 清华大学煤的清洁燃烧技术国家重点实验室开放课题基金资助项目(069806)

作者简介: 苏亚欣(1972-)男,河北高阳人,东华大学讲师,博士。

Copyright © 2002 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



1— 变压器; 2— 电源; 3— 水净化器; 4— 激光器; 5— 激光控制器; 6— 分光组件; 7— 发射单元; 8— 接受单元; 9— 光电转换器; 10— 信号处理器; 11— 计算机; 12— 方形分离器; 13— 流化床段; 14— 料斗; 15— 调节阀门; 16— 笛形管

图 1 实验系统

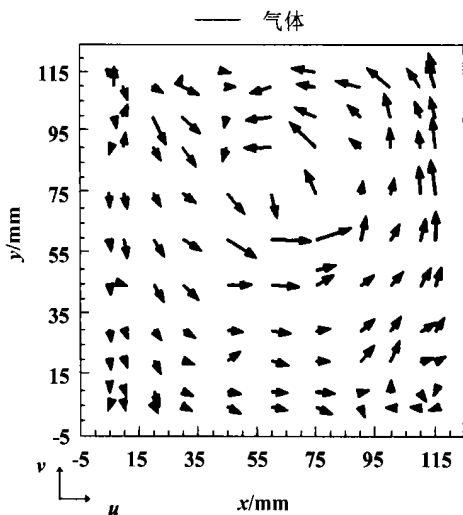


图 2 气相矢量图

水平截面上的流场分布如图 2 所示。从流场的矢量分布看,分离器内的两相流动场有中部的流速较大的强旋流和边壁附近低速的弱旋运动组成,并且在边角处有局部的小旋涡不规则运动。中心部分的流场可以认为是强制涡区,边壁附近可以看作是准自由涡区,因此,方形分离器内的流动也具有 Rankine 涡的某些特点。这种流动结构对分离是十分有利的。中心区域的强旋涡旋运动,离心作用有利于将颗粒甩向外部;而外部的准自由涡区由于旋流强度低,对颗粒的携带作用减弱,特别是跟随性差的较大颗粒,这样便于颗粒在壁面附近被捕集。在边角上,都存在局部的小旋涡,颗粒在此处的运动十分不规则,由颗粒—壁面间的以及颗粒—颗粒间的

碰撞造成强烈的颗粒随机运动。研究表明,在相同(相近)的颗粒浓度条件下,进口风速越高,分离器内的流场旋流强度越大,边角附近的涡及壁面附近的流动越不规则^[10]。

3.2 脉动速度和颗粒浓度分布

湍流脉动速度是由统计方法得到的脉动速度均方根值,定义为

$$\overline{u'} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u_i - U)^2}{(N-1)}} \quad (1)$$

图 3 为脉动速度的测试结果。其它工况下的脉动速度分布类似。从图中看到,脉动速度在 $x = 0$ 时较小,而在 $x = 120 \text{ mm}$ 附近较大。 u' 在靠近前壁面附近脉动幅度比后壁面附近小。三个方向的脉动速度幅度相差较大,说明分离器内的流动的各向异性。

气固两相流动实际上应分为三类主要性质的运动形态,即层流、湍流和介于两者之间的所谓准层流运动以及各过度状态^[9]。准层流脉动包括两类:一类

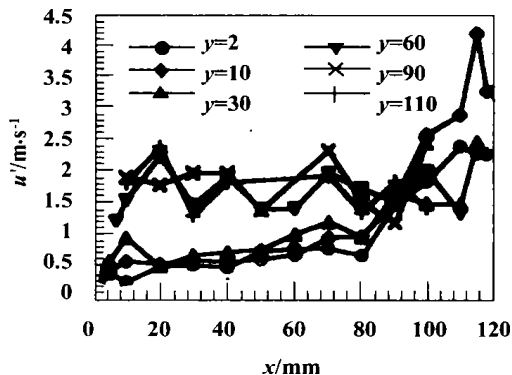


图 3(a) X 向气相湍流脉动速度的分布

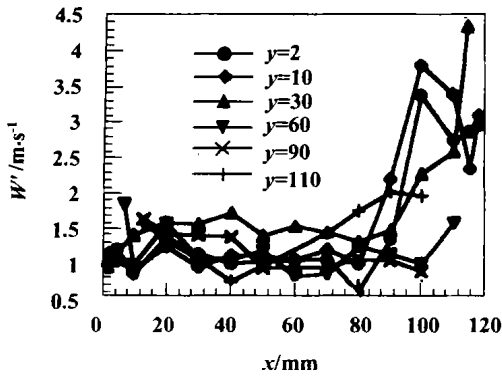


图 3(b) Z 向气相湍流脉动速度的分布

是由颗粒—壁面碰撞或颗粒—颗粒碰撞等引起的颗粒无规则运动, 以及由它们带动的流体脉动。这种脉动几乎是随机的, 无拟序结构, 有点象气体分子的热运动, 但不是完全混沌的。另一类是流体与颗粒相对运动造成颗粒尾流中的脉动。这类脉动有拟序结构, 但尺度较小—颗粒粒径量级或更小, 颗粒后有明显的尾流条件, 也就是颗粒表面有涡的脱落的条件, 大体上是颗粒 Reynolds 数超过 100。颗粒之间有碰撞的条件是颗粒浓度, 尤其是对于颗粒粒径不均匀的流动中。颗粒—壁面碰撞主要是发生在管道壁面收缩或轴线弯曲、折转的流动中。一般说这类原因引起的脉动只出现在局部区域。

分离器内的气固两相运动主要是强旋湍流运动。在边角位置, 流动被迫“急转弯”, 颗粒与壁面以及颗粒相互之间都将产生频繁的碰撞, 从矢量图上已经看到局部角涡的存在^[10]。正是在这里, 两相运动的准层流脉动产生, 从而强化了此处的气固相的脉动速度。在以前的有关方形分离器以及惯性分离器的流场研究文献中, 都认为流场为典型的湍流运动, 实际上, 在两相流动中, 特别是象方形分离器的边角处的流动, 应该是准层流运动, 而非湍流。

气固两相的脉动速度沿 x 方向逐渐增大, 在右侧壁面附近达最大值, 而颗粒数浓度正好相反, 沿 x 方向逐渐减小, 在右侧壁面附近为最小值, 如图 4 所示。颗粒数密度与颗粒的脉动强度(包括湍流脉动和准层流脉动)成反比, 脉动越强则颗粒越少。因此, 颗粒浓度沿某一方向分布的不均匀性是由该方向的颗粒脉动强度的不均匀所引起的。

3.3 湍流动能分布

湍动能定义为:

$$K = \frac{1}{2}(\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2 + \bar{w}'^2) \quad (2)$$

式中 \bar{u}' 、 \bar{v}' 、 \bar{w}' 是脉动速度均方根值。

湍流动能的分布如图 5 所示。从脉动速度的分布已经知道, 湍动能在分离器的右半部比左半部大, 在右前角最大, 图 5 的立体图更形象地表面了这一特点。从湍流脉动速度以及湍动能分布上看, 流场是不均匀的, 而且不对称。在 4 个边角处的运动情况各不相同, 主要是边角的准层流脉动强度不同。文献 [11] 用热线风速仪测量了方形上排气分离器内的湍流动能的分布, 结果为在上部强旋流中, 中心处的湍流动能最大, 4 个角区也较大, 与本文的结果有些不同。

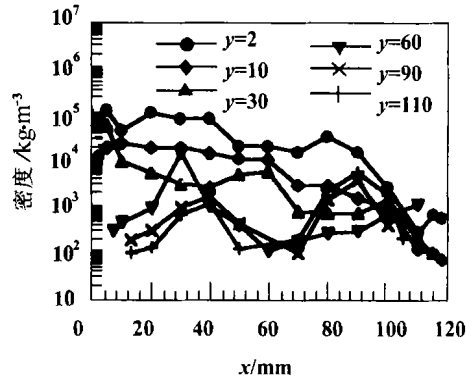


图 4 颗粒数密度分布

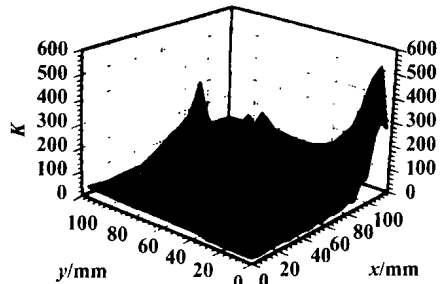


图 5(a) 气相湍动能分布图

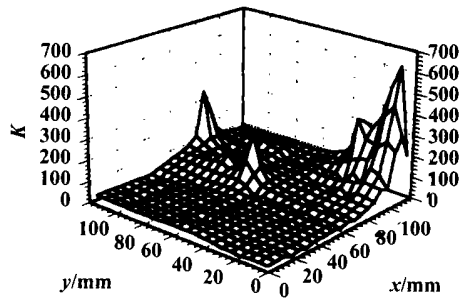


图 5(b) 颗粒($d = 50 \sim 80 \mu\text{m}$)湍动能分布图

3.4 湍流强度分布

局部总湍流强度定义为:

$$Tu = \sqrt{\frac{1}{3}(\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2 + \bar{w}'^2)} / \sqrt{U_{mean}^2 + V_{mean}^2 + W_{mean}^2} \quad (3)$$

式中 \bar{u}' , U_{mean} 分别表示局部测点的脉动速度的均方根和平均速度。

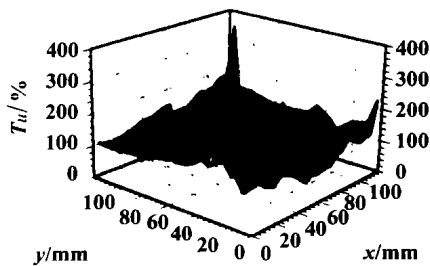


图 6(a) 气相局部湍流强度分布图

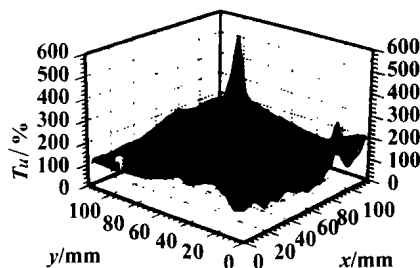


图 6(b) 颗粒($d = 50 \sim 80 \mu\text{m}$)局部湍流强度分布图

局部总湍流强度如图 6 所示。虽然在分离器的右前角附近的脉动速度幅度较大(也就是湍动能较大),但从局部总的湍流强度来看,其最大值并非在分离器右前角,这是因为在 $x = 120 \text{ mm}$ 附近速度 W 最大的缘故。局部总湍流强

度的最大值在分离器的后部,不同粒径的颗粒的湍流强度的峰值位置有些不同。总的来看,大颗粒的湍流强度在整个 $x-y$ 截面上分布比气相和小颗粒要平缓一些。

湍流动能和局部湍流强度在边角附近取得较大值,表明在这里两相流消耗了气流的能量较多,是造成分离器压力损失的主要区域之一。文献研究表明^[2],当在这些角上安装弧形导流装置,消除局部角涡,使流场更接近传统的圆形旋风筒分离器时,压力显著降低,分离效率也有一定程度的下降。从作者的实验结果发现,在边角,特别是正对着进口的壁面的角上,颗粒的垂直向下的速度分量最大^[12]。由此可见,边角有利于颗粒分离,主要原因是脉动强烈,消耗了颗粒和气流的旋流运动的动能。

4 结论

应用三维颗粒动态分析仪(3D-PDA)对方形下排气旋风分离器内气固两相流场进行了实验研究。研究表明方形旋风分离器内的流动具有 Rankine 涡的特点,即中心部分为强制涡区,边壁附近是准自由涡区。边角处因颗粒与壁面间的相互碰撞引起的准层流运动使得颗粒湍流脉动强烈,湍流动能和局部湍流强度在边角附近取得较大值,表明在这里两相流消耗气流的能量较多,是造成分离器压力损失的主要区域之一。边角有利于颗粒分离,主要原因是脉动强烈,消耗了颗粒和气流的旋流运动的动能。

参考文献:

- [1] 梁绍荣. 高温气固分离器的机理及试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1997.
- [2] 邱坤赞, 严建华, 李晓东, 等. 下排气方形旋风分离器结构优化及其分离特性的试验研究[J]. 热能动力工程, 1999, 14(3): 193-194, 199.
- [3] 冯俊凯. 循环流化床锅炉大型化中一些问题的探讨[J]. 锅炉技术, 1993(7): 1-3, 31.
- [4] LUTES I C. CFBC Boilers of foster wheeler Co[R]. Beijing, 1990.
- [5] 许家芹, 肖向东, 周敬业. 大型 CFB 锅炉汽冷式旋风分离制造[J]. 东方锅炉, 1996(2): 7-9, 14.
- [6] KITCHEN W A. Circufluid boilers designed by niley stoker Co[R]. Beijing: 1991.
- [7] 林志杰, 陈汉平, 刘德昌. 下排气中温分离器型循环流化床锅炉的研究与设计[J]. 华中理工大学学报, 1994, 22(3): 16-20.
- [8] 岑可法, 倪明江, 骆仲决, 等. 方形下排气热交换分离器[P]. 中国专利: 94235842. X.
- [9] 刘大有. 两相流体动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [10] 苏亚欣, 周劲松, 骆仲决, 等. 方形分离器内部两相流场的 PDA 实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 42-45.
- [11] 由长福. 方形分离器内气固两相流动的试验研究及数值模拟[D]. 北京: 清华大学, 1996.
- [12] 苏亚欣, 骆仲决, 卓建坤, 等. 方形下排气分离器气固两相流动的 PDA 研究[J]. 动力工程, 2000, 20(6): 941-945.

(渠 源 编辑)

with DeNO_x efficiency being higher than 60%. The overall DeNO_x efficiency of the system can hit 80% after an alkali solution scrubbing. **Key words:** radical, plasma reactor, De_x process, absorption

压气机级间喷水燃气轮机的实验研究 = **Experimental Investigation of Gas Turbine Compressor Interstage Water Spray** [刊, 汉] / LI Shu-ying, SUN Yu-feng, ZHANG Zheng-yi, WANG Song (Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 143 ~ 146

An experimental scheme is proposed for a compressor interstage water spray on an S1A-02 gas turbine. Also given is the law of variation of the turbine various main performance parameters as a function of spray water flow rate under various operating regimes, including the operation under a constant power and constant turbine outlet temperature. On the basis of the test results some conclusions are drawn concerning the influence of compressor interstage water spray on the gas turbine performance. **Key words:** compressor, interstage water spray, gas turbine test

方形旋风分离器内气固两相流湍流特性的研究 = **Experimental Study of the Turbulent Flow Characteristics of Gas-solid Dual-phase Flows in a Square-shaped Cyclone Separator** [刊, 汉] / SU Ya-xin (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080), LUO Zhong-yang, CEN Ke-fa (Institute of Thermal Power Engineering under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 147 ~ 150

A three-dimensional particle dynamics analyzer was employed to study the gas-solid dual flow field in a square-shaped cyclone separator along with a discussion of the distribution of the flow field, pulsation velocity, particle concentration, turbulent kinetic energy and turbulent flow intensity, etc. The flow in the square-shaped cyclone separator has the features of a Rankine vortex, i. e., a forced swirling vortex zone at the central portion and a quasi-free vortex zone near a lateral wall. The quasi-laminar flow movement at the corners due to particle/wall face mutual collision gives rise to an intense particle turbulent-flow pulsation. The turbulent flow kinetic energy and local turbulent-flow intensity attain a relatively great magnitude near the corners. This indicates that the dual-phase flow has consumed a comparatively large amount of gas flow energy near the corners. The latter are the chief zones, where the pressure loss of the separator takes place. These corners were also found to be beneficial to particle separation, mainly because the intense pulsation consumes the kinetic energy of the particle and gas flow vortex movement. The study results can provide basic data for the structural optimization and also experimental contrast information for performing further numerical simulation research. **Key words:** square-shaped separator with downward gas exhaust, gas and solid dual-phase turbulent flow movement, three-dimensional particle dynamic analyzer

两相流垂直下降横掠“T”形柱体的斯特罗哈数 = **Strouhal Number of a Transversely Swept T-shaped Cylinder with a Vertically Downward Two-phase Flow** [刊, 汉] / HE Dan, XU Hua-ming, MA Xin-xia, LI Yong-guang (Power Engineering Department, Shanghai Electric Power Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 151 ~ 153

With respect to two different specifications of trapezoidal cylinder an experimental study was conducted of the variation law of gas-liquid two-phase Strouhal number in case of the occurrence of gas-liquid two-phase vortex street in a vertically downward gas-liquid two-phase flow. On the basis of a huge amount of measured data a general relation was obtained of the gas-liquid two-phase Strouhal number when a gas-liquid two-phase vortex street occurred. The study results indicate that the gas-liquid two-phase Strouhal number is a variable under a two-phase operating condition. It is related to the gas