

文章编号:1000-582X(2011)06-081-06

双进口方形分离器气固流动特性的数值模拟

刘汉周¹, 卢啸风¹, 黄永军²

(1. 重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;
2. 西南电力设计院, 成都 610021)

摘要:采用RSM湍流模型对双进口方形分离器的气相流场进行数值模拟,得到了分离器内的速度场和压力分布;同时采用拉格朗日模型对方形分离器内固体颗粒的轨迹进行模拟。结果表明:双进口方形分离器内速度场和压力场的对称性较好但气流旋转强度不大且容易衰减;不同粒径、不同位置入射的颗粒轨迹有较大差异,细颗粒入射时分离器内容易形成气流短路现象,颗粒靠近分离器顶部入射时分离器内容易造成上灰环现象,给方形分离器的分离效率带来了不利的因素。将方形分离器筒体的四角改为切形倒角,可以很好地改善分离器的流场,并能有效提高分离器分离效率。

关键词:循环流化床;双进口方形分离器;气相流动;颗粒轨迹;数值模拟

中图分类号:TK229.6

文献标志码:A

Numerical simulation of gas solid characteristics in double inlet square cyclone separator

LIU Han-zhou¹, LU Xiao-feng¹, HUANG Yong-jun²

(1. Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems Chongqing University, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Southwest Electric Power Design Institute, Chengdu, Sichuan, 610021, P. R. China)

Abstract: This paper uses RSM turbulence model to conduct the numerical simulation on the gas flow field in double inlet square separator and calculate the velocity field and pressure distribution in the separator. At the same time, it simulates the solid particle trajectories in the separators using Lagrangian model. The results show that the velocity field and pressure distribution in double inlet square separator have good symmetry, but the flow swirl intensity is insufficient and easy to decay; different sizes and different injection locations bring significant differences for the particle trajectories; injecting small particles can be easy to form flow short-circuit phenomenon inside the separator, injecting particles near the top of separator can be easy to form top ash ring phenomenon inside the separator; these phenomena have adverse factors to the separation efficiency. When the separation cylinder corners of square separator are changed into cutting-shaped chamfers, the flow field in the separator can be improved, and the separation efficiency of separator can be effectively improved.

Key words: circulation fluidized bed; double inlet square cyclone separator; flow of gases; particles track; numerical simulation

在循环流化床(CFB)锅炉中,气固分离机构是 CFB系统核心部件之一。只有当分离器完成了含尘

气流的气固分离并连续把收集下来的物料回送到炉膛,实现灰平衡和热平衡,才能保证炉内燃烧的稳定

收稿日期:2010-12-06

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAA03B02-06)

作者简介:刘汉周(1976-),男,重庆大学博士,主要从事洁净煤燃烧技术研究,(E-mail)hzliu@cqu.edu.cn。

和高效^[1]。除了 CFB 锅炉常用的圆筒结构旋风分离器外,近年来,一种新型的方形分离器得到了快速的发展。方形分离器能够满足 CFB 锅炉物料循环的需要^[2-5],同时实现了循环流化床锅炉的 II 形结构布置,并且当采用水冷壁结构时容易加工,有利于实现循环流化床锅炉的结构紧凑和大型化。目前对单进口方形分离器已有比较深入的研究^[2-14],如文献[5]提出通过改变中心筒的直径和插入深度、入口高宽比、直段高度等来优化方形分离器性能;文献[8]提出改变中心筒相对直径、中心筒形状、进气方式等来优化方形分离器性能;文献[13]提出在方形分离器内布置一种反射内锥来改善分离效率。目前还未见文献对双进口方形分离器进行较为系统的研究。

根据方形分离器在布置上的优点,笔者提出一种“炉膛包围分离器”的新型循环流化床锅炉布置方案^[15-16]。该方案将一双进口的方形分离器布置在两炉膛的中间,形成双炉膛单分离器的结构,由于炉膛一分为二,具有对二次风射程要求低的特点。其中,双进口方形分离器的性能是保证“炉膛包围分离器”的大型 CFB 锅炉布置方案实现的关键。

由于方形分离器内复杂的流动规律以及试验条件的限制,很难通过试验的方法预报分离器内部的流动状况,而数值模拟技术则具有限制因素少、计算速度快、信息完全、仿真能力强的特点。为了克服试验条件的诸多限制、充分认识这一新型双进口方形分离器复杂的内部流场,采用流体力学软件 FLUENT6.2 对双进口方形分离器进行了三维数值模拟。

1 数值模拟概况

1.1 物理模型

图 1 为“炉膛包围分离器”方案的冷态试验台结构示意图。

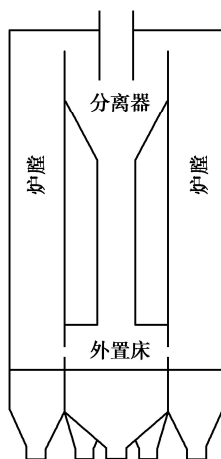


图 1 “炉膛包围分离器”大型化方案

在前期可行性的冷态试验研究基础上^[15],以冷态试验台的关键设备双进口方形分离器为数值模拟对象。图 2 为双进口方形旋风分离器的物理模型,图 2 中“改进前”指筒体未倒角,“改进后”指筒体四角进行了倒角处理。分离器进口截面尺寸为 80 mm × 80 mm,整个分离器高 720 mm,其中直管段高 320 mm,锥形段高 400 mm,直管段的截面尺寸为 180 mm × 170 mm。在网格化的过程中使用了约 23 万个四面体网格。

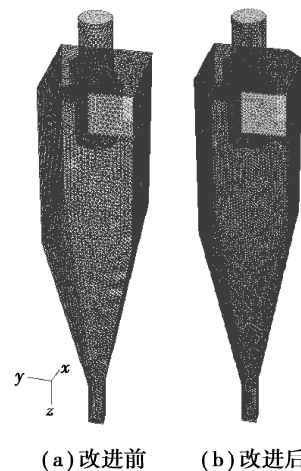


图 2 物理模型几何结构及网格划分

1.2 数学模型

根据文献[14],方形分离器内部气流流动是三维强旋、各向异性的湍流流动。因此,对其进行模拟必须抛弃基于涡粘性假设基础上的双方程模型,而直接求解雷诺应力的输运项^[17-18]。文中采用雷诺应力模型(RSM)对方形分离器内的气相流场进行数值计算。

为了研究颗粒在分离器内的运动轨迹,文中所采用的是颗粒轨道模型的一种,属离散介质模型,即只把流体当作连续介质,而把颗粒作为离散介质处理。该模型考虑了气相湍流对颗粒的作用,而不考虑颗粒运动对气相的影响,在拉格朗日坐标系下计算颗粒的随机轨迹及沿轨道的变化经历。

1.3 边界条件

计算中,所有工况下的分离器入口边界条件设置的气流速度均为 11.9 m/s,工质为 20 °C 的空气,密度 $\rho=1.205 \text{ kg/m}^3$,动力粘度 $\mu=18.1 \times 10^{-6} \text{ kg/(m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。入口湍流指定方法为指定湍流强度 I 和入口截面的水力直径 D_H 。湍流强度为: $I=u/u_{av}=0.16 \text{ Re}^{-1/8}$, $\text{Re}=VD_H/\nu$ 。式中, u 、 u_{av} 、 Re 分别表示入口湍流的平均脉动速度、主流速度和雷诺数; V 为截面上的流体速度; ν 为流体的动力粘度。排气管出口边

界定义为压力出口,压力为 0 Pa。颗粒捕集口边界定义颗粒相为“捕集”的壁面,固壁边界设为无滑移边界,颗粒相密度与前期冷态试验用漂珠密度相同^[15],为 620 kg/m^3 。

1.4 计算过程

数值计算采用非交错网格下的 SIMPLEC 算法;离散格式中对流项采用 QUICK 格式、压力插补格式采用 PRESTO 格式控制。

2 改进前数值模拟结果及分析

2.1 气相流场模拟

2.1.1 速度分布模拟

从图 3 和图 4 可以看出,双进口分离器的流场具有良好的对称性,左右两侧切向速度和轴向速度在数值上基本相当。主要是由于双进口方形分离器左右两侧同时进风,2 股对称气流的叠加有利于流场的对称性。在 X 轴方向上,切向速度沿径向先增大后平稳变化,在靠近壁面处迅速衰减,而轴向速度在分离器内呈现明显的外层气流下行、内层气流上行的双层流动结构,随着径向距离的增大呈现先降后升趋势,外层向下气流速度总体上要小于内层向上气流速度。

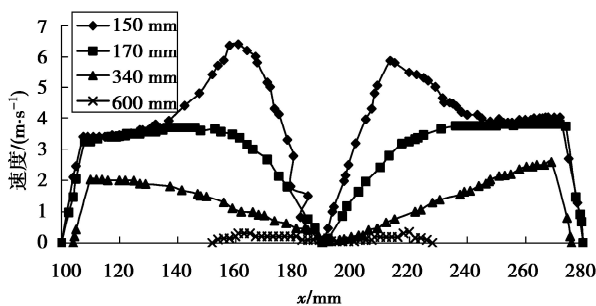


图 3 不同深度截面上的切向速度分布

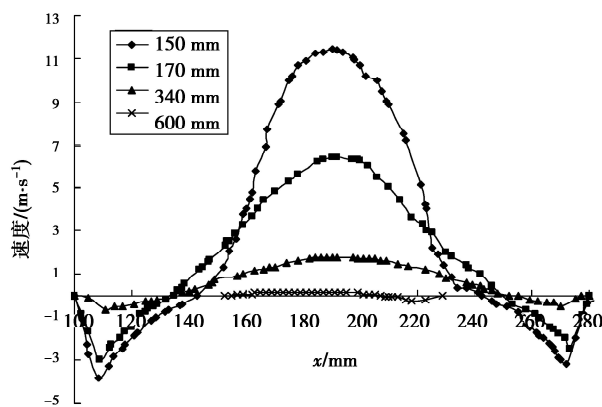


图 4 不同深度截面上的轴向速度分布

从图 3~图 5 可以看出,只有在分离器内上部

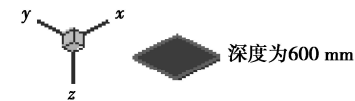
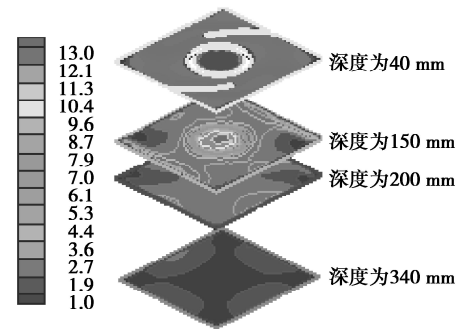


图 5 不同深度截面上的速度分布

空间的截面上存在明显的环状双涡结构,在深 340 mm 的截面上速度已经基本没有变化,而且随着深度的增加各个速度分量都快速减小,气体在方形分离器内并没有形成良好的旋转场,分离器内中部以下空间没有形成类似圆形分离器的环状双涡结构。

2.1.2 压力分布模拟

图 6 为分离器深度 150 mm、170 mm、340 mm 和 600 mm 截面处,通过数值模拟得到的径向压力分布。从图 6 可以看出,径向压力分布对称性较好。在分离器内上部空间的截面处出现中心的低压区与周围的高压区相对应环核结构,此时分离器中心筒附近压力变化较大,压力沿径向距离的增大呈递增趋势,在中心位置出现负压区。随着分离器深度的增加,中心与壁面处的压力变化减弱,在深 340 mm 的截面上压力分布已经基本没有变化。

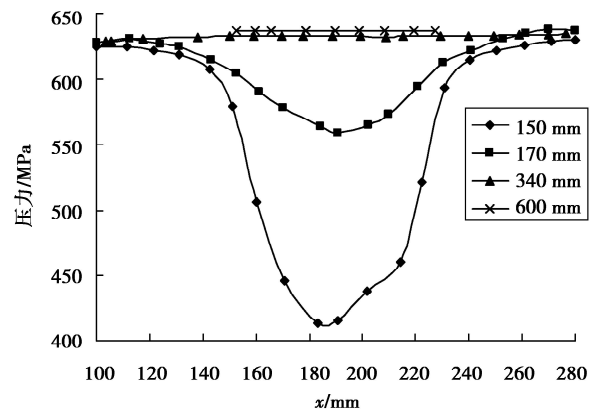


图 6 不同深度截面上的压力分布

2.2 颗粒轨迹模拟

颗粒轨迹模拟主要考虑了不同颗粒尺寸、不同入射位置对分离器内颗粒轨迹的影响。

2.2.1 颗粒尺寸对颗粒轨迹的影响

从图 7 中可以看出, 细的颗粒运动轨迹较为简单, 存在着严重的短路流现象, 从分离器入口中心入射的 0.01 mm 颗粒的分离效率几乎为零; 粗颗粒的运动轨迹比较简单, 经过第一次碰壁后便贴壁下落进入底部的立管, 从分离器入口中心入射的 0.05 mm 颗粒的分离效率达到了 100%。对于粗颗粒来说, 其对气体的跟随性较差, 而受重力的作用较为明显, 因此与壁面碰撞后, 较快的落入分离器下部而被捕集; 对于细颗粒来说, 所受的重力作用较小, 在径向气流的向心作用下很容易在中心筒进气段短路而较早的从分离器中逃逸。

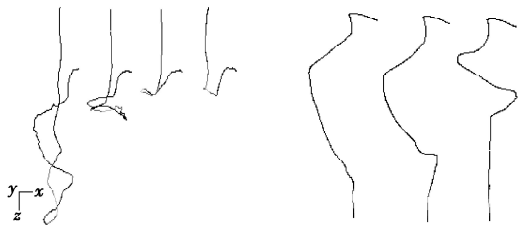


图 7 入口中心位置处不同粒径入射的颗粒轨迹

2.2.2 入射位置对颗粒轨迹的影响

从图 8 可以看出, 相同的粒径、不同的入射位置, 其运动轨迹也是不同的。从右下角入射的颗粒, 经过与壁面的一次碰撞后便贴壁下落, 在分离器的

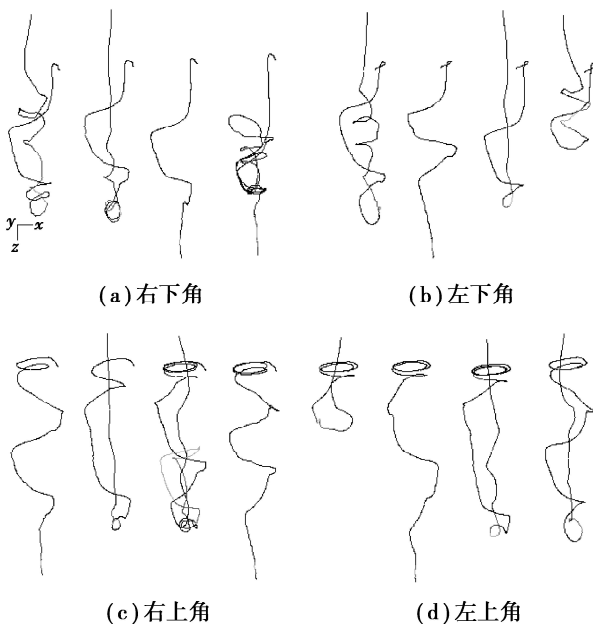


图 8 0.03 mm 颗粒在不同位置入射的颗粒轨迹

中间位置开始随气流旋转。而从左下角入射的颗粒, 由于受加速弧形挡板的影响惯性有所降低, 颗粒轨迹相对于右下角的颗粒变得简单, 旋转强度明显下降。从右上角和左上角入射的颗粒, 由于靠近分离器的顶部, 颗粒在分离器上部经过多次复杂的运动后又贴壁回转而下, 最终在强湍流脉动气流作用下, 部分颗粒被随机带入中心筒。

另外从图 8(c)、(d)中可以看到, 分离器入口端面顶部入射的颗粒容易在上顶盖附近徘徊作圆周运动, 但是由于特殊的方形结构减弱了颗粒在分离器内的旋转运动, 其中大部分颗粒最终会被气流带走而重新进入分离空间, 对颗粒分离不利。

3 改进后数值模拟结果及分析

通过以上分析可以看出, 方形分离器内旋转强度较弱的流场给分离器带来了不利的因素。为了改善双进口方形分离器内的气固流场, 提高其分离效率, 在方形分离器的四角各加一切形倒角(如图 9 及图 2(b)所示)。

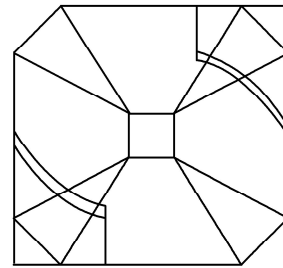


图 9 改进后的方形分离器俯视图

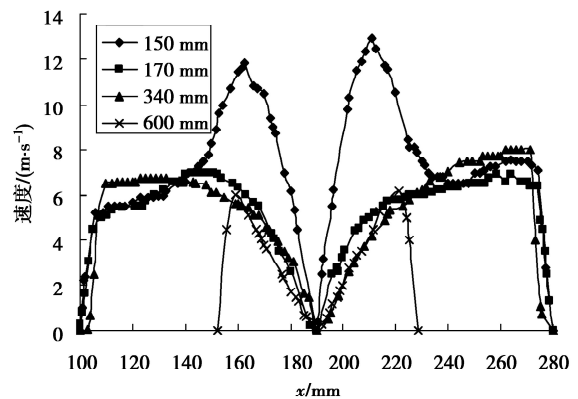


图 10 不同深度的切向速度分布

比较图 10 与图 3, 改进后方形分离器的切向速度不但整体得到大幅提高, 而且随着深度的增加对切向速度的影响已十分微弱, 分离器内不同深度近壁处的切向几乎都保持在 5~7 m/s 之间, 即使是在较为接近分离器底部的 600 mm 深处, 近壁处的切

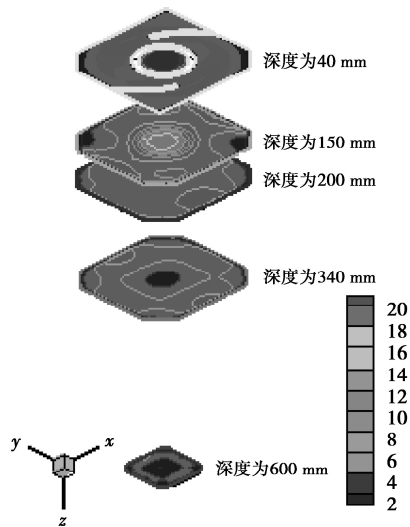
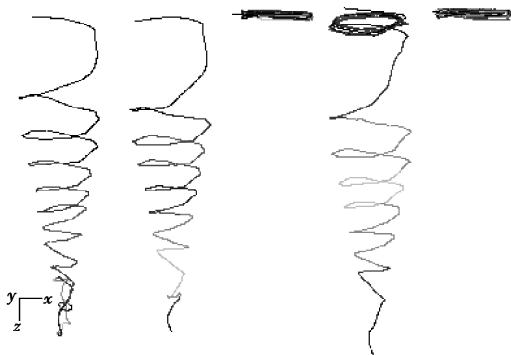


图 11 不同深度的速度分布模拟图

向速度也基本没有减弱。从图 11 也可以看出,倒角的加入很好地改善了方形分离器内的气固流动场,角涡现象有所减弱,双涡核的结构已逐步形成,作为主旋流动的外旋气流速度变化较为平缓,而且速度有明显增大,这对提高分离器的分离器性能有至关重要的作用。

流场的改善同时也影响了颗粒的运动轨迹,图 12 为改进后的颗粒轨迹,与改进前的颗粒轨迹相比,各位置入射的颗粒轨迹都发生了明显的变化,由于流场的改善及切向速度的增加,颗粒惯性增大,颗粒轨迹变得复杂且旋转圈数明显增多,有了近似圆形旋风分离器的颗粒轨迹,颗粒的分离效果得到了明显的改善。但从图 12 中也可以看到,分离器上顶盖附近入射的部分颗粒始终在上顶盖附近徘徊而无法分离,从而形成了“上灰环现象”;同时,右下角的颗粒被下行气流带入灰斗的过程中,又被灰斗的上行气流夹带反混回来,形成了排尘口反混现象。



(a) 右下角 (b) 左下角 (c) 右上角 (d) 左上角

图 12 改进后 0.03 mm 颗粒在不同位置入射的颗粒轨迹

从计算模拟来看,将分离器四角改为弧形导流装置后,局部角涡的消除使流场更接近传统的圆形旋风筒分离器,改进后的分离器的流场得到了有效改善,在整个分离器分离空间内双涡旋的“环核结构”较为明显。从图 13 可以看出,改进后的分离器分离效率大幅提高,倒角的改进达到了改善分离器性能及提高分离效率的目的。

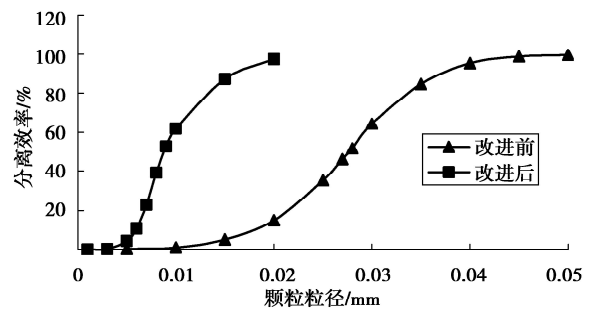


图 13 改进前后分级分离效率对比图

4 结 论

基于 FLUENT 软件采用 RSM 模型模拟了气相紊流特性,采用随机轨道模型模拟了颗粒的运动轨迹。得出以下结论:

- 1) 双进口方形分离器内的流场具有良好的对称性,但沿深度方向旋转强度衰减较快,分离器中下部空间没有形成环核结构的旋转场。
- 2) 不同入射位置的颗粒运动轨迹存在较大差异,接近分离器顶部的入射颗粒容易形成上灰环现象,不利于颗粒的分离。
- 3) 入射颗粒粒径越小越容易受二次涡流影响,形成短路流,从而降低了分离器的分离效率。
- 4) 与分离器改进前比较,分离器四角加倒角后,流场得到了很好的改善,分离器内切向速度能增加 1 倍左右,分离效率也有较大的提高。

参考文献:

- [1] 许伟伟,金有海,王建军. CFB 用旋风分离器内气相流场的数值研究[J]. 过滤与分离,2008,18(1):11-14,26. XU WEI-WEI, JIN YOU-HAI, WANG JIAN-JUN. Numerical simulation of the gas flow in the cyclone separator used in the CFB boiler [J]. Journal of Filtration and Separation, 2008, 18(1): 11-14, 26.
- [2] ARMAN R, MEHRZAD S, HOMAYOON K. CFD analysis of flow field in square cyclones [J]. Powder Technology, 2009, 191(3): 349-357.
- [3] LV J F, ZHANG J S, ZHANG H. Performance

- evaluation of a 220t/h CFB boiler with water-cooled square cyclones[J]. *Fuel Processing Technology*, 2007, 88(2):129-135.
- [4] 王玉召,吕俊复,张建胜,等. 220t/h 水冷方形分离器循环流化床锅炉的性能[J]. *动力工程*, 2005, 25(3): 343-347.
WANG YU-ZHAO, LV JUN-FU, ZHANG JIAN-SHENG, et al. Performance of a 220 t/h circulating fluidized bed boiler with water cooled square shaped separator[J]. *Journal of Power Engineering*, 2005, 25(3):343-347.
- [5] 王玉召,杨海瑞,岳光溪. 方形分离器结构优化试验研究[J]. *热能动力工程*, 2007, 22(2):158-162.
WANG YU-ZHAO, YANG HAI-RUI, YUE GUANG-XI. An experimental study of the structural optimization of square shaped cyclone separators [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2007, 22(2):158-162.
- [6] SU Y X. The turbulent characteristics of the gas-solid suspension in a square cyclone separator[J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61(5): 1395-1400.
- [7] SAFIKHANI H, SHAMS M, DASHTI S. Numerical simulation of square cyclones in small sizes [J]. *Advanced Powder Technology*, 2010, 22:1-7.
- [8] 余战英,魏铜生,陈晓宇,等. 不同结构因素下方形旋风分离器分离性能的试验研究[J]. *动力工程*, 2004, 4(1): 147-151.
YU ZHAN-YING, WEI TONG-SHENG, CHEN XIAO-YU, et al. Experimental research on separation performance for square cyclone separator under different constructional details [J]. *Journal of Power Engineering*, 2004, 24(1):3147-3151.
- [9] SU Y X, MAO Y R. Experimental study on the gas-solid suspension flow in a square cyclone separator[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2006, 121(1): 55-58.
- [10] 周强,程乐鸣,骆仲泱,等. 方形卧式分离器的 PIV 流场试验研究[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2006, 40(1): 126-130.
ZHOU QIANG, CHENG LE-MING, LUO ZHONG-YANG, et al. Experimental research on flow field of horizontal square cyclone using particle image velocimetry [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2006, 40(1):126-130.
- [11] WANG S R, FANG M X, LUO Z Y. Instantaneous separation model of a square cyclone [J]. *Powder Technology*, 1999, 102(1):65-70.
- [12] GAMBLE R, HYPPANEN T, KAURANEN T. Compact a second generation CFB boiler by ahlstrom pyropower [C]//Proceeding of the 12th International Conference on Fluidized Bed Combustion. May 9-13, 1993, LaJolla, CA. USA: San Diego California ASME, 1993: 751-760.
- [13] 李浩,刁永发,顾平道,等. 带内锥的切向进口扩散式方形分离器内气相流场的数值模拟[J]. *华东大学学报*, 2008, 34(6):732-735.
LI HAO, DIAO YONG-FA, GU PING-DAO, et al. Numerical simulation of gas flow in the tangential inlet diffuse square separator [J]. *Journal of Donghua University*, 2008, 34(6):732-735.
- [14] 王玉召,王启民,吕俊复,等. 带入口加速段的方形分离器内气固两相流动数值模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(11):45-49.
WANG YU-ZHAO, WANG QI-MIN, LV JUN-FU, et al. Numerical simulating the gas-solid flow in square cyclone with a curved inlet [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(11):45-49.
- [15] 黄永军,卢啸风,刘汉周. 大型循环流化床锅炉的结构布置与试验研究[J]. *动力工程*, 2006, 26(1):49-53.
HUANG YONG-JUN, LU XIAO-FENG, LIU HAN-ZHOU. Structural layout of large circulating fluidized bed boilers and study tests performed [J]. *Journal of Power Engineering*, 2006, 26(1):49-53.
- [16] XIONG B, LU X F, AMANO R S, et al. Experimental research on gas-solid flow in a square cyclone separator with double inlets [C]// Proceedings of the 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion. May 18-20, 2009, Xi'an, China. Beijing: Tsinghua university press, 2009:393-397.
- [17] SHIN M S, KIM H S, JANG D S. A numerical and experimental study on a high efficiency cyclone dust separator for high temperature and pressurized [J]. *Environments Applied Thermal Engineering*, 2005, 25: 1821-1835.
- [18] WAN G J, SUN G G, XUE X H, et al. Solids concentration simulation of different size particles in a cyclone separator [J]. *Powder Technology*, 2008, 183: 94-104.

(编辑 陈移峰)