

百叶窗煤粉浓缩器两相流场速度分布的实验研究

管晓艳, 孙绍增, 郝伟, 陈力哲, 王正阳, 孙锐

(哈尔滨工业大学燃烧工程研究所, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

Experimental Study on Velocity Distribution of the Gas-Solid Two Phase Flow in a Louver Coal Concentrator

GUAN Xiaoyan, SUN Shaozeng, HAO Wei, CHEN Lizhe, WANG Zhengyang, SUN Rui

(Research Institute of Combustion Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: As a key part of the horizontal bias combustion (HBC) technology, the louver coal concentrator has been developed and successfully applied to many large-scale utility boilers. The gas-solid two phase flow was investigated using particle dynamics analyzer (PDA) to study the gas/solid separation mechanism in a louver coal concentrator. Gas-solid two phase field in typical sections, near the blade surface and fuel-rich side exit of the louver coal concentrator were obtained. The results show that the particle concentrate in the louver coal concentrator due to the collision between particles and the blade near the blade surface as well as gas-solid velocity slip between two blades. Blades concentrate particles near the blade and influence little in the zones away from blades. The erosion wall area in fuel-rich side exists between the last blade to $0.7a$ (" a " is the width of the louver coal concentration) away from it and anti-erosion measures should be considered in application.

KEY WORDS: louver; coal concentrator; gas-solid two phase flow; experiment

摘要: 百叶窗煤粉浓缩器作为水平浓淡燃烧技术的关键部件已在电站锅炉中得到了广泛应用。为深入研究百叶窗煤粉浓缩器的气固分离机制, 采用粒子动态分析仪 (particle dynamics analyzer, PDA) 对百叶窗煤粉浓缩器内气固两相流动进行了测量, 获得了浓缩器典型截面区域、叶片表面附近及浓侧出口区域的流场分布。实验结果表明, 叶片表面附近颗粒与叶片的碰撞反弹及两级叶片之间的气固速度滑移是形成浓缩器内颗粒浓缩的本质所在; 叶片只浓缩叶片附近区域的颗粒, 而对远离叶片的浓侧区域则影响较小; 浓侧壁面磨损区域主要发生在末级叶片喉口到距喉口 $0.7a$ (a

为浓缩器的宽度) 范围内, 在浓缩器的应用中需考虑此处的防磨措施。

关键词: 百叶窗; 煤粉浓缩器; 气固两相流动; 实验

0 引言

为了在燃用劣质煤时提高锅炉的燃烧效率和降低 NO_x 排放, 同时解决火焰的稳定性、结渣及炉膛水冷壁管的高温腐蚀问题, 哈尔滨工业大学提出了水平浓淡煤粉燃烧技术^[1-4]。作为该技术的核心部件, 百叶窗煤粉浓缩器已经广泛应用到电站锅炉中。百叶窗浓缩器的工作原理如图 1 所示。一次风煤粉气流进入浓缩器后, 在叶片的作用下, 被分成浓度不同的 2 股气流。通过调整叶片的排列来调整叶片两侧的煤粉浓度, 从而满足不同的需求。百叶窗浓缩器最重要的性能指标是浓淡风比、浓缩比和阻力损失系数, 具体定义见文献[5]。

关于百叶窗浓缩器的研究已有近 20 年的历史, 积累了丰富的理论和实践经验^[6-13]。在百叶窗浓缩器的气固流动研究方面, 范卫东等^[10]首次利用二维相位多普勒粒子分析仪 (phase Doppler particle analyzer, PDPA) 测量了百叶窗浓缩器内气固两相流动特性, 其中浓缩器宽度为 80 mm, 所用物料玻璃微珠平均粒径 $50 \mu\text{m}$, 每个测点采集 5000 个粒子, 浓度较高的点测量时间为 1 s 左右。实验获得了浓缩器典型截面上气固流动参数的分布特点, 指出颗粒的惯性碰撞浓缩行为是浓缩器中的主要浓缩作用; 为获得高的浓缩效果, 应尽量把高浓度粉区的颗粒输送到远离叶片的浓侧区域。

本文在总结已有研究成果的基础上, 设计二维百叶窗浓缩器冷态模化实验台并采用粒子动态分析仪 (particle dynamics analyzer, PDA) 对浓缩器内的

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2007AA05Z336)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2007AA05Z336).

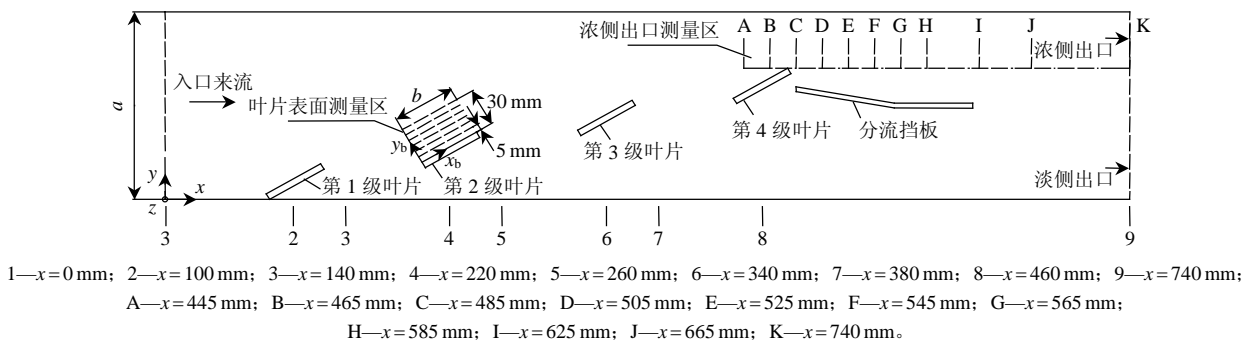


图1 百叶窗煤粉浓缩器结构示意图

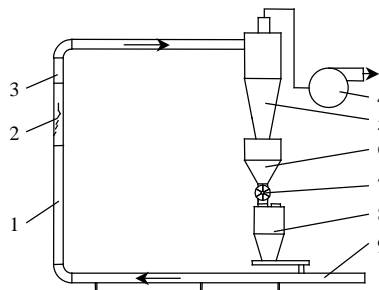
Fig. 1 Schematic diagram of the louver coal concentrator

气固流动进行了详细测量,着重测量了浓缩器典型截面、叶片表面附近及浓侧出口区域的流动特性。实验结果为分析百叶窗浓缩器的气固分离机制提供了理论依据。

1 实验系统及测量方法

1.1 实验系统

百叶窗浓缩器气固两相实验系统如图2所示。实验用物料为玻璃微珠,密度为 2500 kg/m^3 。采用英国马尔文公司生产的Mastersizer-2000粒度分析仪(精度为1%)测得的粒径分布如图3所示,平均粒径约为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 。实验台按照模化比1:2.67设计,模



1—入口稳定段; 2—百叶窗浓缩器实验段; 3—出口稳定段;
4—引风机; 5—旋风除尘器; 6—集粉罐; 7—星形下料阀;
8—螺旋给料机; 9—风量测点。

图2 百叶窗煤粉浓缩器PDA实验系统图

Fig. 2 Schematic diagram of the louver coal concentrator PDA experiment system

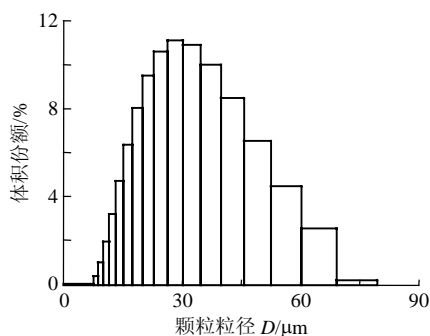


图3 玻璃微珠粒径分布

Fig. 3 Particle diameter distributions

型与实物的斯托克斯数 St 分别为 0.759 和 0.734。模化实验台可以反映实际应用中浓缩器内平均粒径 $51\text{ }\mu\text{m}$ 煤粉颗粒的流动特性。实验用风源由引风机提供,通过变频器调节风机转数,进而控制实验用风量。总风量通过差压传感器(精度为0.5%)实时监测。百叶窗浓缩器实验段主体及叶片部分均为玻璃结构,采用福泰光固化胶粘剂UV-5028(俗称无影胶)粘接,保证了实验段结构尺寸的精确性及系统的密封性。为减少流通截面变化对流动的影响,分别加装 1.8 m 长的入口稳定段、 0.3 m 长的出口稳定段。

百叶窗浓缩器内的流动近似为二维流动^[5],因此在本文中不考虑气流在 z 方向的扩散。设计时,浓缩器厚度(z 向)为 0.04 m ,宽度 a 为 0.15 m 。

1.2 实验参数及测点布置

实验中,浓缩器入口风速 u_0 为 20 m/s ,给粉浓度为 0.1 kg/kg 。实验测点均布置在浓缩器中截面上,如图1所示。截面1~9及截面A~K上,测点在 y 向间隔为 5 mm 。在叶片表面测量区,各截面在 y_b 方向间距为 5 mm ,每个截面上测点间隔为 4 mm 。

1.3 实验测量仪器及精度

百叶窗浓缩器内气固两相流场的测量采用丹麦Dantec公司研制的PDPA测试系统。该系统可实现颗粒的三维速度、粒径和浓度的同时测量,具有较高的精度和空间分辨率,且无需标定,是一种非接触式测量技术,速度测量的精度可达1%。在PDPA测量系统信号的接收方式上,前向接收相比后向接收可以获得最强的信号和最好的信噪比,因此实验中采用前向接收方式,散射角为 24.5° 。

测量过程中,浓度较高的区域采集粒子速度很快,有的甚至平均 1 s 左右就可以采集几千个粒子,实验中两相流动的脉动势必会影响采集数据的准确性。为了获得合理的采集数据,本文在实验中通过增加采集粒子数来减弱脉动的影响。在截面1~9

及截面 A~K 上设定采集粒子数为 20000 个，在叶片表面测量区设定采集粒子数为 60000 个。这样，即便是浓度较高的区域，采集时间也可以保证在 10s 以上。而对于布置在浓缩器淡测区域的测点，颗粒浓度较小，要采集到 20000 个粒子是不现实的，实验中采集 2min，可以保证该区域测点采集的粒子数一般均不少于 2000 个。

2 实验结果及分析

2.1 典型截面区域速度分布

截面 1~9 上各测点在 y 向的位置坐标无因次化后以 y/a 表示， x 向、 y 向的时均速度无因次化分别以 u/u_0 、 v/u_0 表示， x 向、 y 向脉动速度大小以 u_{rms} 、 v_{rms} 表示。实验中，以 $0\sim 5\mu\text{m}$ 的颗粒示踪气相，以 $10\sim 80\mu\text{m}$ 的颗粒示踪固相。在叶片表面附近及浓侧出口区域，以 $25\sim 35\mu\text{m}$ 的颗粒代表平均粒径为 $30\mu\text{m}$ 的颗粒，以 $55\sim 65\mu\text{m}$ 的颗粒代表平均粒径为 $60\mu\text{m}$ 的颗粒。

图 4 为截面 1~9 上气固两相沿 x 向时均速度 u 的分布。在入口截面 1 上，气相和颗粒相的速度沿浓缩器宽度方向基本均匀， y/a 在 $0\sim 0.2$ 范围内气流速度略小是由第 1 级叶片对气流的阻塞效应造成的。从截面 2 开始，浓侧区域气相和颗粒相的速度逐渐增加。截面 2、截面 4、截面 6 和截面 8 为经

过叶片区域的截面，浓侧区域气相速度和颗粒相速度基本一致。截面 3、截面 5 和截面 7 为两级叶片之间的区域，远离叶片靠近浓侧的区域气相和颗粒相速度基本一致，而靠近叶片附近的浓侧区域气固之间存在明显的速度滑移，颗粒相速度滞后于气相速度，这说明颗粒与叶片碰撞后导致自身能量损失，在反弹到气流中的过程中，有从气流中挣脱出来进入浓侧的趋势，从而形成颗粒的浓缩；叶片只浓缩叶片附近的颗粒。截面 3~8 上叶片背面附近，气相和颗粒相的速度出现负值，说明在此区域出现了回流，叶片背面存在旋涡。从截面 4 开始，淡侧气相和颗粒相速度逐渐增加。在出口截面 9 上，气相和颗粒相速度分布基本重合，浓侧速度最大值约为主流速度的 1.25 倍，浓淡两侧的风速比为 1.3。

图 5 为截面 1~9 上气固两相沿 y 向时均速度 v 的分布。在入口截面 1 上，气相速度和颗粒相速度接近于 0，表明第 1 级叶片对截面 1 上 y/a 在 $0\sim 0.2$ 范围内主流速度造成影响的同时，并没有对气流和颗粒在横向的流动产生明显影响。在截面 2~8 的浓侧区域，气相和颗粒相的横向速度逐渐增加，叶片附近的横向速度较大且气相和固相的速度滑移逐渐从正滑移转变为截面 8 上的负滑移，这说明颗粒与叶片的碰撞反弹加速了颗粒在横向上的运动速度，颗粒更容易进入到浓侧区域从而形成浓侧高浓

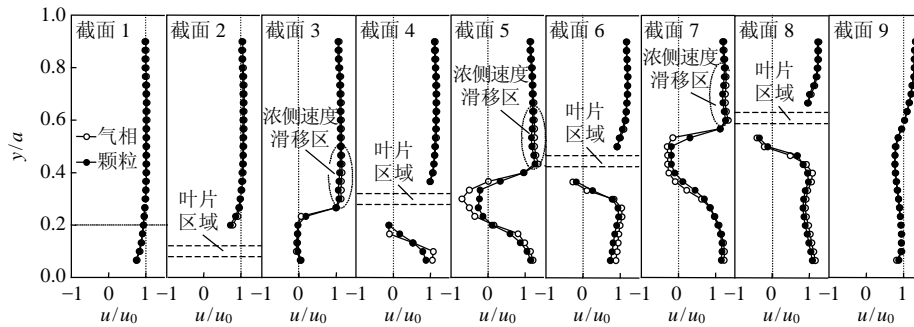


图 4 各截面 x 向时均速度 u 分布

Fig. 4 Mean velocity u in different sections of the louver coal concentrator along x direction

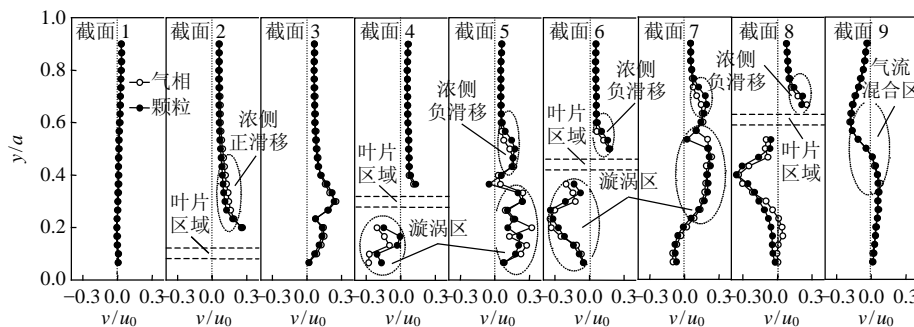


图 5 各截面 y 向时均速度 v 分布

Fig. 5 Mean velocity v in different sections of the louver coal concentrator along y direction

度粉区。在截面4、截面6和截面8上,淡侧区域气相和颗粒相的横向速度出现负值,说明一部分气流携带着颗粒流向了淡侧。截面4和截面5以及截面6和截面7的淡侧区域分别出现了负向速度和正向速度,且这两对截面分别位于第2级叶片及第3级叶片背面,这表明在叶片背面存在旋涡。从叶片背面正负速度在浓缩器宽度上的范围可以看出,第3级叶片背面的旋涡明显大于第2级叶片背面的旋涡。截面8的淡侧区域存在负向速度,依据以上的分析可知第4级叶片背面存在旋涡。由于第1级叶片背面浓度较小,且存在叶片挡光的问题,因而实验中没能获得截面2上位于第1级叶片背面的实验数据,但可以推断第1级叶片背面也有旋涡存在。在出口截面9上,浓侧区域气相和颗粒相的横向速度为负值,这主要是由于较浓的颗粒流在经过末级叶片喉口后撞击到浓侧壁面最终反弹回主流中形成的,可以预见这种速度分布对浓侧壁面的磨损有很大关系。在截面9的中心区域,具有正负速度的两股气流交汇,说明两相流在经过浓缩器分离后,两相流的速度将会重新均匀分布。

图6、7为截面1~9上气固两相沿 x 、 y 向脉动速度 u_{rms} 和 v_{rms} 的分布。总体上看,气固两相 x 向脉动速度大于 y 向脉动速度;入口截面1及各截面的浓侧远离叶片区域脉动速度较小,且气相和固相

的脉动速度基本一致,维持在 $1\sim 2\text{ m/s}$ 附近;在浓侧靠近叶片的区域,气固两相的脉动速度大于远离叶片靠近浓侧壁面区域的脉动速度,且固相的脉动速度大于气相脉动速度,分析认为颗粒与叶片的碰撞反弹加强了两相流的湍流脉动,而这种加强作用对颗粒相影响更大,这也将有助于气固在此处的分离;淡侧区域脉动速度较大,且有脉动速度峰值的存在,表明叶片背面存在旋涡。由图6可见,截面5和截面7分别位于第2级叶片和第3级叶片背面,在此区域存在脉动速度 u_{rms} 的双峰结构,说明该区域存在两个以脉动速度峰值所在位置为核心的旋涡区域。在出口截面9的中心区域,脉动速度 v_{rms} 明显大于浓淡两侧靠近壁面的脉动速度,这也再次说明了两相流经过浓缩器分离后,两相流的速度在出口区域将会重新均匀分布。

2.2 叶片表面附近区域

图8为叶片表面附近各截面上气固两相沿 x 、 y 向脉动速度 u_{rms} 和 v_{rms} 的分布。在 $L=30、25、20\text{ mm}$ 截面上,气相和颗粒相的脉动速度 u_{rms} 和 v_{rms} 的大小维持在 $1\sim 1.5\text{ m/s}$ 附近,随着叶片级数的增加变化不大,说明在此区域两相流动受叶片的影响较小。从 $L=15\text{ mm}$ 截面开始逐渐靠近叶片的截面上,气相和颗粒相的脉动速度 u_{rms} 和 v_{rms} 逐渐增加,且随叶片级数的增加而呈现小幅增加的趋势,这表明

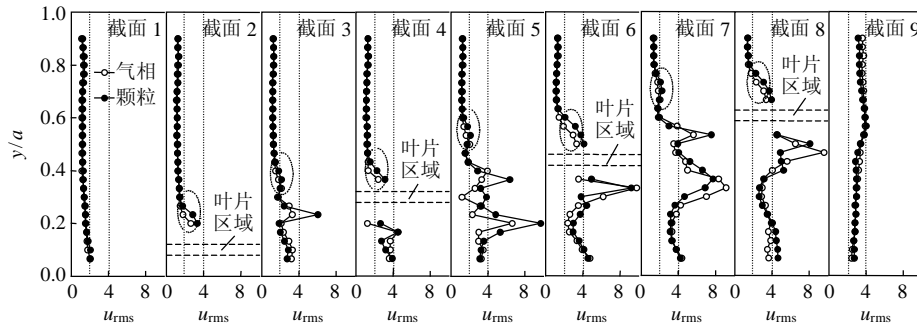


图6 各截面 x 向脉动速度 u_{rms} 分布

Fig. 6 Fluctuating velocity u_{rms} in different sections of the lower coal concentrator along x direction

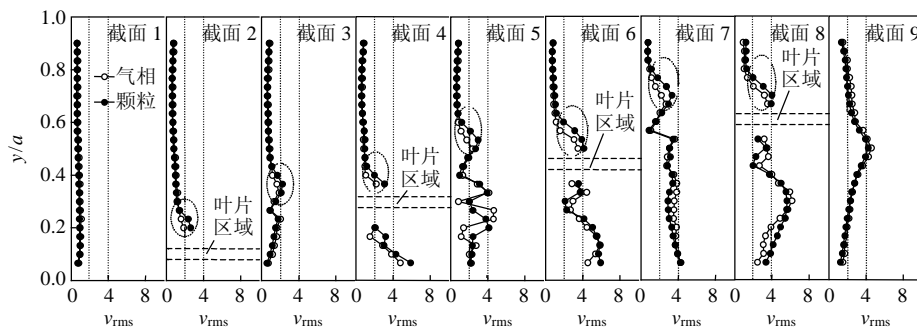


图7 各截面 y 向脉动速度 v_{rms} 分布

Fig. 7 Fluctuating velocity v_{rms} in different sections of the lower coal concentrator along y direction

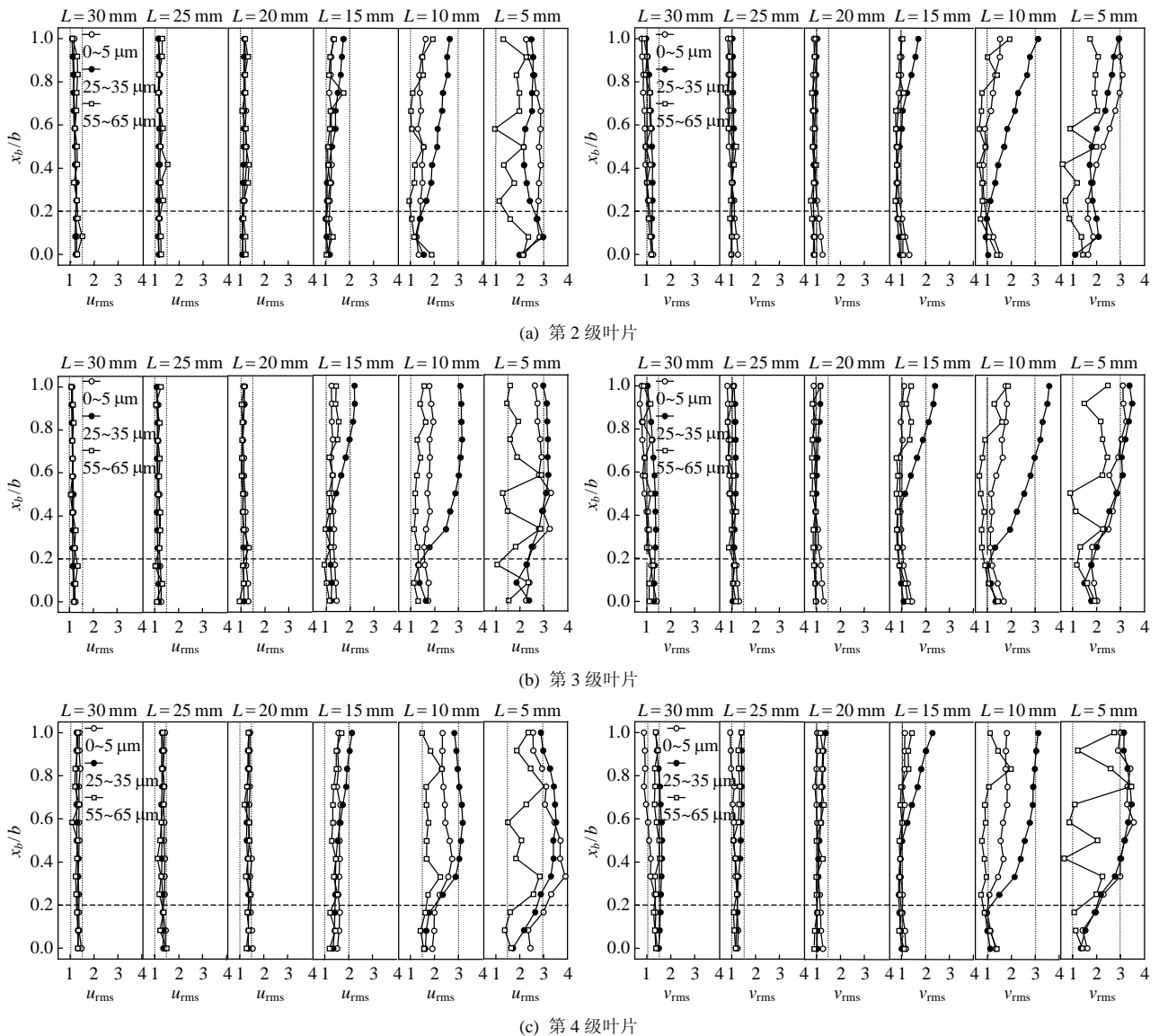


图 8 叶片表面附近各截面脉动速度分布

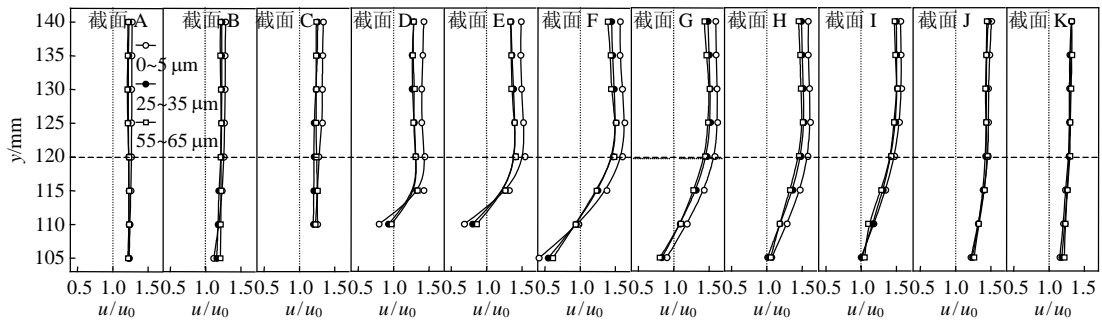
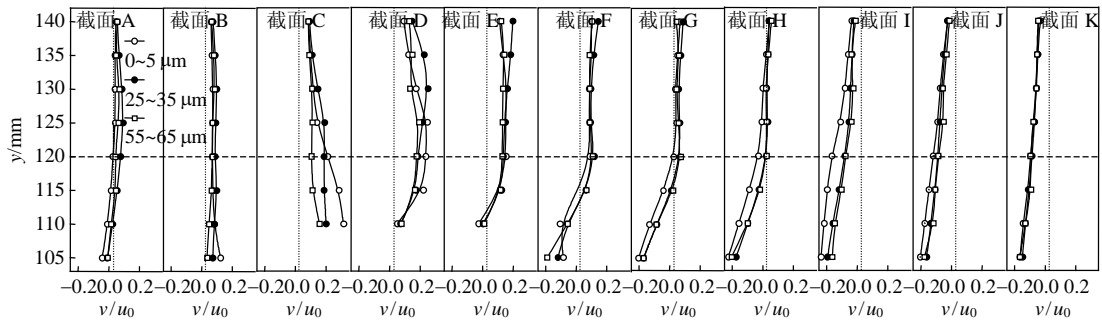
Fig. 8 Fluctuating velocity in different sections near the blade surface

在此范围内的两相流动受叶片的影响较大，后级叶片对流动的影响更为明显； x_b/b 在 0~0.2 范围内时，气相和颗粒相的脉动速度 u_{rms} 和 v_{rms} 较小，说明叶片前端对两相流动的影响较小；在叶片的末端附近，脉动速度较大，说明在此区域高速的气流冲击到叶片后产生了较强的湍流扩散，颗粒与叶片发生了剧烈碰撞。由图还可以看出，叶片附近两相流脉动速度最大的区域在距离叶片 10mm 的范围内，且在此区域内，小颗粒(25~35 μm)的脉动速度明显大于大颗粒(55~65 μm)的脉动速度，分析认为：颗粒在与叶片碰撞后反弹的过程中，大颗粒惯性大，具有较强湍流脉动的气流对其影响较小，因而脉动速度相对较小；小颗粒惯性小，跟随性强，因而其脉动速度表现出与气流较为接近的特征。

2.3 浓侧出口区域

图 9 为浓侧出口截面 A~K 上气固两相时均速度 u 的分布。从截面 A 开始，各截面在距离浓侧壁面 30mm 的范围内，气相和固相的速度分布较为均匀，并逐渐增加。气相与平均粒径为 30、60 μm 的颗粒之间存在明显的速度滑移。从截面 D 开始，浓侧流通截面积突扩，两相流向分流隔板处扩散，因而在远离浓侧壁面 30mm 外的区域，气相和颗粒相的速度明显小于靠近浓侧壁面处的速度。在出口截面 K 上，气固之间的速度滑移基本消失。

图 10 为浓侧出口截面 A~K 上气固两相时均速度 v 的分布。从截面 A 到截面 E，气固横向速度从接近于 0 逐渐增加，说明一部分颗粒以一定角度撞击到浓侧壁面上，这将导致浓侧壁面的磨损问题。

图9 浓侧出口 x 向时均速度 u 分布Fig. 9 Mean velocity u in different sections on fuel-rich side exit along x direction图10 浓侧出口 y 向时均速度 v 分布Fig. 10 Mean velocity v in different sections on fuel-rich side exit along y direction

在截面 H 上, 靠近浓侧壁面附近处气固横向速度接近于 0, 随着远离浓侧壁面, 气固横向速度逐渐开始转为负值, 说明颗粒撞击到浓侧壁面后反弹到主流中。在截面 I~K 上, 气固横向速度全为负值, 说明此处的颗粒全部为经撞击浓侧壁面反弹到主流中的。

在截面 G~J 上, 时均速度 u 、 v 都呈现出颗粒相的速度滞后于气相速度, 且大颗粒(55~65 μm)的速度略微滞后于小颗粒(25~35 μm)的速度, 这说明颗粒以一定角度撞击浓侧壁面后反弹回主流的过程中损失了能量, 而大颗粒与壁面的碰撞更剧烈, 损失能量也更多。Hamed 等人^[14]的研究指出, 颗粒对壁面的磨损与颗粒的粒径、冲击速度和角度及壁面的材质等因素有关。通过对图 9、10 的分析可以推测, 浓侧壁面磨损区域主要发生在截面 B 至截面 H 之间, 即末级叶片喉口附近到距喉口 $0.7a$ (a 为浓缩器宽度)位置范围内, 在浓缩器的应用中需考虑此处的防磨措施。

3 结论

1) 本文通过对百叶窗浓缩器典型截面区域速度分布与脉动速度分布分析表明, 叶片表面附近颗粒与叶片的碰撞反弹及 2 级叶片之间的气固速度滑移是形成浓缩器内颗粒浓缩的本质与机制所在。

2) 在叶片表面附近, 颗粒与叶片的碰撞反弹加速了颗粒在横向上的运动速度, 颗粒容易进入到浓侧区域从而形成浓侧高浓度粉区。在 2 级叶片之间的区域, 颗粒相速度滞后于气相速度, 颗粒与叶片碰撞后导致自身能量损失, 在反弹到气流的过程中, 有从气流中挣脱出来进入浓侧的趋势, 从而形成此区域的颗粒浓缩。

3) 叶片只浓缩叶片附近区域的颗粒, 而对远离叶片的浓侧区域则影响较小。叶片对其表面附近的两相流动影响较显著的范围在距离叶片 10 mm 的范围内。

4) 浓侧壁面磨损区域主要发生在末级叶片喉口附近到距喉口 $0.7a$ (a 为浓缩器宽度)范围内, 在浓缩器的应用中需考虑此处的防磨措施。

参考文献

- [1] 孙绍增. 水平浓缩煤粉燃烧过程的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1995.
Sun Shaozeng. Study on combustion processes with horizontal bias combustion pulverized coal burners[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1995(in Chinese).
- [2] 秦裕琨, 邢春礼, 孙绍增, 等. 百叶窗煤粉浓缩器: 中国, CN2157400 [P]. 1994-02-23.
Qin Yukun, Xing Chunli, Sun Shaozeng, et al. Louver coal concentrator: China, CN2157400[P]. 1994-02-23(in Chinese).
- [3] 邢春礼. 水平浓缩煤粉燃烧流动问题的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨

- 工业大学, 1995.
Xing Chunli. Research on the flow of horizontal bias pulverized coal combustion[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1995(in Chinese).
- [4] 王志强, 孙绍增, 窦礼亮, 等. 叶片间距对五级叶片百叶窗煤粉浓缩器性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(14): 27-31.
Wang Zhiqiang, Sun Shaozeng, Dou Liliang, et al. Effect of blade spaces on the performance of a five stage blades louver coal concentrator[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(14): 27-31(in Chinese).
- [5] 范卫东. 百叶窗浓缩器性能及流动特性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999.
Fan Weidong. Study on performance and flow characteristics of louver concentrator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1999(in Chinese).
- [6] 范卫东, 高继慧, 孙绍增, 等. 百叶窗浓缩器内叶片及壁面磨损数值预测[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(10): 75-79.
Fan Weidong, Gao Jihui, Sun Shaozeng, et al. Numerical simulation study about the louver concentrator erosion by pulverized coal flow[J]. Proceedings of the CSEE 2000, 20(10): 75-79(in Chinese).
- [7] 聂其红, 孙绍增, 吴少华, 等. 新型水平浓淡风低 NO_x 煤粉燃烧器在贫煤锅炉的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 155-159.
Nie Qihong, Sun Shaozeng, Wu Shaohua, et al. Study on application of new type HBS-SSA burners with low NO_x emissions in a lean coal fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 155-159(in Chinese).
- [8] 孙锐, 孙绍增, 李争起, 等. 煤粉浓缩器内气固两相流动特性的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2004, 40(3): 35-39.
Sun Rui, Sun Shaozeng, Li Zhengqi, et al. Numerical simulation of gas-particle two phase in a pulverized-coal concentrator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(3): 35-39(in Chinese).
- [9] 范卫东, 高继慧, 林正春, 等. 百叶窗浓缩器性能的试验及数值模拟研究[J]. 动力工程, 2000, 20(5): 831-838.
Fan Weidong, Gao Jihui, Lin Zhengchun, et al. Experiment and numerical simulation study about performance of louver pulverized coal concentrator[J]. Power Engineering, 2000, 20(5): 831-838(in Chinese).
- [10] 范卫东, 章明川, 高继慧, 等. 百叶窗浓缩器内气固两相流动 PDDA 试验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2001, 7(3): 214-218.
Fan Weidong, Zhang Mingchuan, Gao Jihui, et al. PDDA experimental study on gas-solid flow in louver concentrator[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2001, 7(3): 214-218(in Chinese).
- [11] 孙绍增, 王志强, 姜文龙, 等. 叶片转动角度对百叶窗浓缩器性能的影响[J]. 热能动力工程, 2007, 22(4): 423-426.
Sun Shaozeng, Wang Zhiqiang, Jiang Wenlong, et al. A study of the effect of blade rotating angles on the performance of a louver concentrator[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22(4): 423-426(in Chinese).
- [12] 牛海峰, 吴少华, 范卫东, 等. 百叶窗煤粉浓缩器叶片磨损及抗磨性的研究[J]. 动力工程, 2000, 20(4): 760-763.
Niu Haifeng, Wu Shaohua, Fan Weidong, et al. Study about abrasion and abrasion-resistance of blade of the louver pulverized coal concentrator (LPCC)[J]. Power Engineering, 2000, 20(4): 760-763(in Chinese).
- [13] 朱群益, 姜文龙, 葛健, 等. 弯头和百叶窗浓缩器联合作用时浓淡风比试验[J]. 动力工程, 2004, 24(5): 623-626.
Zhu Qunyi, Jiang Wenlong, Ge Jian, et al. Experimental research on ratio value of dense airflow rate for Lean airflow rate under coalition of duct elbow and Louver Concentrator[J]. Power Engineering, 2004, 24(5): 623-626(in Chinese).
- [14] Hamed A, Tabakoff W. Erosion and deposition in turbomachinery[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006(22): 350-360.



管晓艳

收稿日期: 2010-01-25。

作者简介:

管晓艳(1980), 女, 博士研究生, 主要研究方向为煤粉浓淡燃烧技术及气固流动的数值模拟, guanxy@hit.edu.cn;

孙绍增(1963), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为煤的清洁燃烧和污染控制技术, 流动、传热和燃烧过程的数值模拟, 生物质的资源化利用, sunsz@hit.edu.cn。

(责任编辑 车德竞)