

堵塞和煤粉浓缩器对旋流两相流动影响的研究

张宇^{1,2} 周力行¹ 张健¹

(1. 清华大学工程力学系, 北京 100084; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 旋流煤粉燃烧器加进口堵塞和煤粉浓缩器可以影响湍流, 燃烧温度以及煤粉浓度的分布, 从而影响 NO 的生成与排放。本文用三维相位多普勒颗粒测速仪 (PDPA) 测量和双流体模型数值模拟研究了堵塞和煤粉浓缩器对旋流煤粉燃烧器内两相流动的影响。实验结果和数值模拟结果基本符合。实验和模拟结果都表明, 无论是进口堵塞还是煤粉浓缩器都会增加旋流燃烧器的进口湍流度, 同时增加进口轴线附近的颗粒浓度, 后者将有利于降低 NO 排放。

关键词 煤粉燃烧; NO 生成; 堵塞; 煤粉浓缩器

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2004)05-0867-04

PDPA STUDIES ON THE EFFECT OF BLOCKINGS AND CONCENTRATORS TO THE TURBULENCE AND PARTICLE CONCENTRATION IN A SWIRL BURNER

ZHANG Yu^{1,2} ZHOU Li-Xing¹ ZHANG Jian¹

(1. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Swirl burners are widely used in coal-fired boilers at power stations. To develop low-pollutant burners, the effect of inlet blocking on NO formation is studied. It is recognized that the NO formation is affected by the turbulence, coal concentration and temperature. In this paper, the turbulence and coal concentration in swirl burners with an inlet blocking or a coal concentrator were measured. A DANTEC-made 3-D phase-Doppler particle anemometer (PDPA) installed in the State key Laboratory of Clean Coal Combustion is used to measure the particle velocity and concentration. The measurement results are compared with those obtained by numerical simulation. Both measurement and simulation results indicate that either the blocking or the coal concentrator increases the turbulent kinetic energy at the inlet region and the particle concentration in the near-axis region, which is favorable for reducing the NO emission during coal combustion.

Key words coal combustion; NO formation; inlet blocking; particle concentration

1 前言

旋流煤粉燃烧器广泛应用于电站锅炉中, 低污染旋流燃烧器的研制对环保十分重要。使用化学方法降低污染的研究比较广泛, 改变流体动力学因素来控制污染还有待于更系统的研究。不久前的研究表明, 随着旋流数的增加, NO 的排放先减少后增加^[1]。但是, 旋流数不仅影响 NO 排放, 同时还影响火焰稳定和煤粉燃尽率, 所以不能任意改变。因此, 必须寻找其他方法来改变湍流, 控制燃料空气的混合, 达到降低 NO 排放的目的。一种可能的方法是使用进口堵塞或煤粉浓缩器。关于进口堵塞的

研究, 早期主要集中在液体燃料燃烧方面, 堵塞实际上起到了类似于钝体的作用, 可以产生回流区, 稳定火焰^[2]。可以预计, 堵塞一定会影响煤粉燃烧中湍动能, 燃烧温度以及煤粉浓度的分布。煤粉浓缩器已经被国内外广泛采用, 作为低负荷稳燃的方法。堵塞和煤粉浓缩器究竟对两相流动特性的影响如何, 尚待研究。本文使用三维相位多普勒颗粒测速仪 (PDPA, Phase-Doppler Particle Anemometer), 对旋流煤粉燃烧器冷态模型内加入进口堵塞和煤粉浓缩器等不同工况下的两相速度, 湍动能分布, 以及颗粒浓度分布进行了测量, 同时用基于 $k-\varepsilon-k_p$ 两

收稿日期: 2003-12-03; 修订日期: 2004-06-15

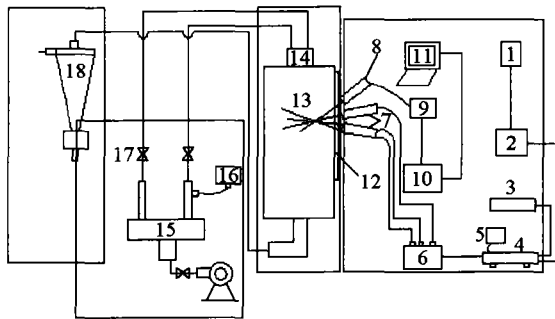
基金项目: 国家重点基础研究专项经费资助项目子课题 (G1999-0222-07)

作者简介: 张宇 (1973-), 男, 北京人, 博士, 主要从事燃烧学的研究。

相湍流模型的 CFD 程序进行了数值模拟, 探讨进口堵塞和煤粉浓缩器对两相流动特性的影响。

2 实验装置和 PDPA 测量系统

图 1 为实验系统。其中供气供粉系统包括鼓风机、减速箱式螺旋供粉器、分风器和管道。鼓风机将风送入分风器, 然后通过各自的管道分别送到燃烧器各通道进口。总风量由鼓风机挡板开度控制。燃烧器各通道进风量由风管上的阀门调节。通过管道上的笛形管, 用数字式微压计来测量风量。减速箱式螺旋供粉器连接在一次风进风管上, 供入平均粒径为 $45 \mu\text{m}$ 的玻璃微珠。排气分离系统由旋风分离器和引风机等组成。玻璃微珠由旋风分离器回收。乏气通过分离器的排气口排空。小于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒代表完全追随气相的示踪颗粒。



1. 变压器 2. 电源 3. 水净化器 4. 激光器 5. 激光分光器
6. 分光组件 7. 发射单元 8. 接收单元 9. 光电转换单元
10. 信号处理器 11. 数据处理器 12. 平面玻璃板
13. 模拟燃烧器 14. 旋流煤粉燃烧器进口 15. 分风器
16. 供粉器 17. 调节阀 18. 旋风分离器

图 1 实验系统图

测量两相速度、湍流度和颗粒浓度用 Dantec 公司生产的三维相位多普勒颗粒测速仪 (PDPA, Phase-Doppler Particle Anemometer)。PDPA 光路是后向散射布置的, 如图 2 所示。每一个测点在 180 秒内取 3000 个样品。

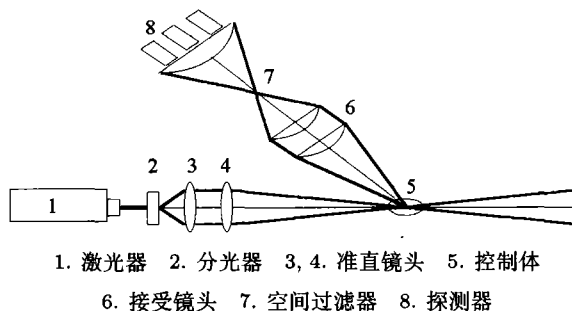


图 2 PDPA 测量系统布置图

实验段为所研究的旋流煤粉燃烧器的冷态模型, 其结构如图 3 和图 4 所示。其中工况 1 是加入圆锥型浓缩器的情况, 由于锥形通道的作用, 在一二次风之间将有一股低速空气携带少量煤粉进入燃烧器, 而一次风将以比较高的速度携带大量煤粉从中心进入燃烧器, a 通道的气流速度为 b 通道气流速度的 4.5 倍。工况 2 是在一、二次风之间加入圆柱型堵塞的情况, 由于堵塞的作用煤粉将向中心浓缩, 而在一二次风之间气体速度为零, 且没有煤粉进入燃烧器。工况 3 是没有浓缩器的基本工况。表 1 给出了燃烧器的冷态模型的几何尺寸。表 2 给出了实验的进口参数。

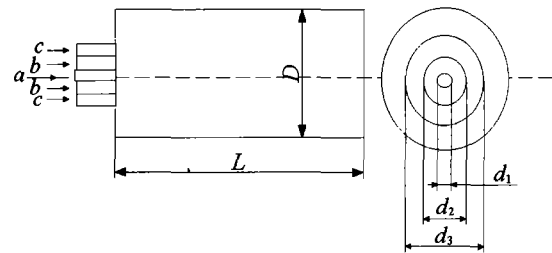


图 3 旋流燃烧器冷态模型

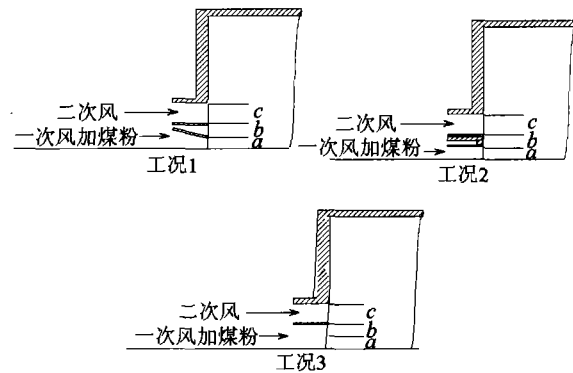


图 4 旋流煤粉燃烧器的三种工况

表 1 冷态模型的几何尺寸

D	L	d_1	d_2	d_3
0.15 m	1.0 m	0.011 m	0.026 m	0.056 m

表 2 进口参数

	空气 (kg/h)	煤粉流量 (kg/h)	旋流数
一次风	21.77	12.77	0.0
二次风	63.33	0.0	1.0

3 数值模拟

本文使用基于 $k - \epsilon - k_p$ 两相湍流模型的三维 CFD 程序^[3]对上述工况下的两相流动进行了数值模拟。数学模型的阐述见文献 [1]。网格数为 $55 \times 24 \times 11$ 。在 P-IV-1.5G PC 的计算机上运行一个工况需要 3 个小时左右。对边界条件, 认为各变

量在出口处达到充分发展, 沿纵向梯度为零。在轴线处取对称条件。在壁面处, 对气体采用速度无滑移条件, 零梯度浓度条件。对颗粒, 在壁面处取与壁面平行的速度梯度为零, 对垂直于壁面的速度和颗粒浓度梯度, 取为零。对气固两相的数值解法均采用 SIMPLEC 算法, 即 $p-v$ 修正, TDMA 逐面和逐线迭代以及低松弛法。收敛准则为两相最大余源和均小于 10^{-3} 。

4 结果和讨论

图 5 是工况 1 的气体轴向速度分布。预报值与实验值符合较好。图 6, 图 7 和图 8 分别是三种工况的湍动能分布。预报值同样接近实验值。可以看出, 在上游处, 有浓缩器的工况 1 和工况 2 的湍动能明显高于没有浓缩器的工况 3 的相应值, 而且工况 2 的更高。在下游处, 三种工况的湍动能相差不大。煤粉浓缩器和堵塞会增加燃烧器进口处湍动能, 其中堵塞增加的更加明显。

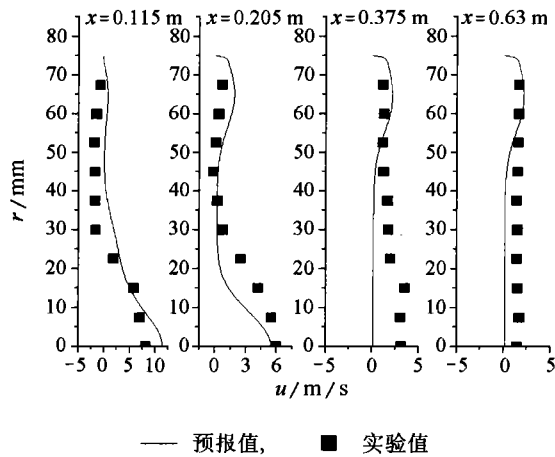


图 5 工况 1 的轴向速度分布

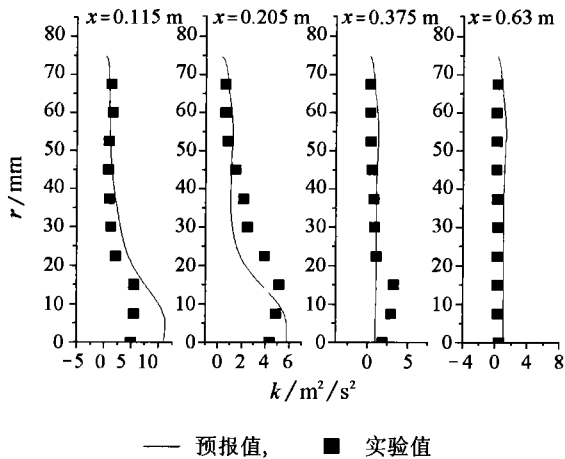


图 6 工况 1 的湍动能分布

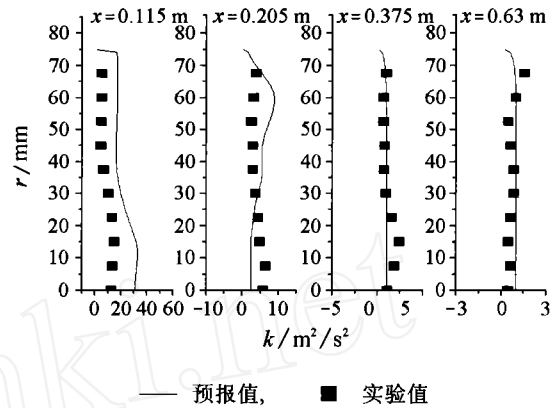


图 7 工况 2 的湍动能分布

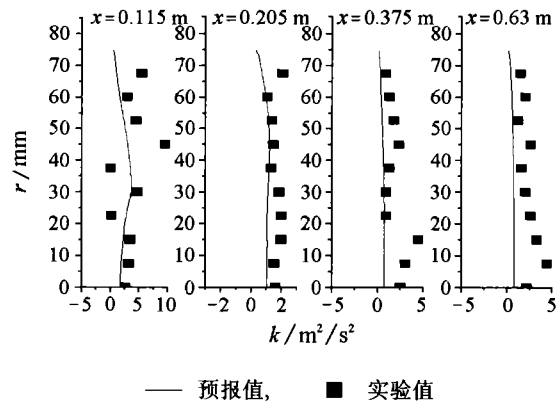


图 8 工况 3 湍动能分布

图 9 和图 10 分别是三种工况的颗粒相对数密度在 $x = 0.25 \text{ m}$ 处分布的实验值和预报值。尽管 PDPA 测量颗粒浓度的误差很大, 二者仍然定性符合。显然, 工况 1 和工况 2 在中心处的颗粒浓度明显高于没有煤粉浓缩器的工况 3 的相应值, 而且工况 2 的更高。工况 3 由于没有煤粉浓缩装置, 旋流的作用使靠近壁面的地方出现浓度升高的情况。总之, 环型堵塞和煤粉浓缩器都会使煤粉向中心浓缩, 其中环型堵塞的浓缩效果更明显。

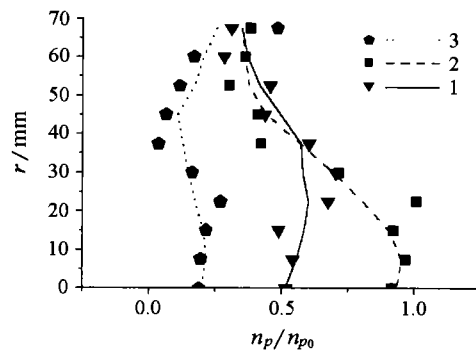


图 9 颗粒相对数密度

(实验, $x = 0.25 \text{ m}$, 图中 1, 2, 3 代表工况 1, 2, 3)

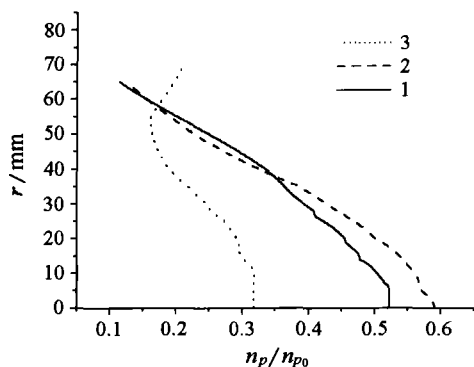


图 10 颗粒相对数密度
(预报, $x = 0.25$ m, 图中 1, 2, 3 代表工况 1, 2, 3)

5 结 论

(1) 堵塞和煤粉浓缩器都会增加进口湍动能。

(2) 堵塞和煤粉浓缩器都会增加进口轴线附近的颗粒浓度。

(3) 堵塞和煤粉浓缩器将在煤粉燃烧器进口附近形成低 NO 燃烧。

致谢 感谢清华大学热能工程系李彦老师和阎德中老师在 PDPA 测量中给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] Zhou L X, Zhang Y, Zhang J. Simulation of Swirling Coal Combustion Using a Full Two-Fluid Model and an AUSM Turbulence-Chemistry Model. *Fuel*, 2003, 82: 1001-1007
- [2] 周力行. 燃烧理论和化学流体力学. 北京: 科学出版社, 1986
- [3] Zhou L X, Guo Y C, Lin W Y. Two-Fluid Models for Simulation Reacting Gas-Particle Flows, Coal Combustion and NO_x Formation. *Combustion Science and Technology*, 2000, 150: 161-180