

# 旋流浓淡煤粉燃烧器出口区域气固两相流动特性的实验研究

(清华大学工程力学系) 李志强 李荣先 崔龙铉 周力行  
(哈尔滨锅炉有限责任公司) 李文健 陈济荣 张恩仲

**摘要:**采用三维相位多普勒颗粒分析仪(PDA)对旋流浓淡燃烧器出口区域两相流动特性进行了实验研究,获得了该燃烧器在不同旋流叶片开度、旋流二次风和直流二次风配比下的气固两相流场和浓度场的分布规律,并且对这些分布规律进行了分析。

**关键词:**旋流浓淡煤粉燃烧器;气固两相流;三维相位多普勒颗粒分析仪(PDA);旋流叶片开度;风量配比

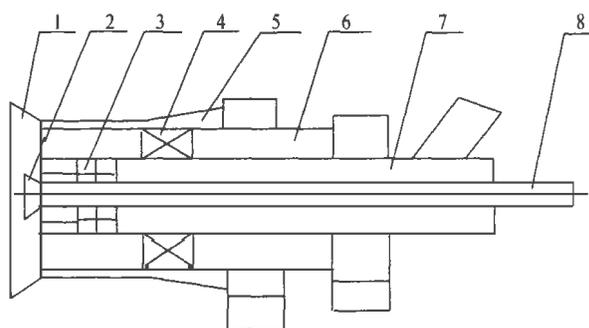
中图分类号:TK223.23, O643.134

## 1 前言

目前我国火电燃用煤种变化较大,电站变负荷、低负荷运行任务不断增加,同时环境污染日趋严重,要求锅炉燃烧器在保证较高的燃烧效率的基础上能够适应煤种多变和负荷多变,并且降低 $\text{NO}_x$ 的排放。由于浓淡煤粉燃烧技术在强化燃烧、稳定燃烧以及降低 $\text{NO}_x$ 污染物排放方面的显著优势,在国内外得到了广泛的应用。与普遍使用的双调风旋流燃烧器相比,新型旋流燃烧器采用浓淡煤粉技术后,在燃烧器出口形成局部煤粉高浓度区,这是获得良好燃烧的基础,可以实现低负荷稳燃和低 $\text{NO}_x$ 排放,我们在以前的实验中已经证实这一点<sup>[1,2,3]</sup>。然而,由于我国电站锅炉燃用煤种的多变和负荷的多变,一种新设计的旋流浓淡煤粉燃烧器如何在运行中适应煤种和负荷的变化,已成为该技术应用中急需解决的问题。因此,本文采用相位多普勒颗粒分析仪(PDA)对该燃烧器在不同旋流叶片角度和不同一、二次风配比下出口区域的气固两相流动特性进行了较细致的研究,并获得了一些重要结果。

## 2 旋流浓淡煤粉燃烧器的结构与工作原理

新型旋流浓淡煤粉燃烧器的结构如图1所示,



1. 扩口 2. 钝体 3. 煤粉浓缩构件 4. 旋流二次风叶轮  
5. 直流二次风管 6. 旋流二次风管 7. 一次风管 8. 中心管

图1 浓淡旋流燃烧器示意图

它包括中心管、一次风管(内部安装浓缩构件)、二次风管(旋流、直流二次风管)四个管道,中心管带有钝体,直流二次风管带有扩口。其基本工作原理是利用具有弱旋的浓缩构件对煤粉气流的导向作用,强迫风粉气流改变流动方向,通过颗粒惯性远大于空气的惯性,实现煤粉气流的浓缩和分流,将一次风粉混合物分成煤粉浓度相差适当的两股:靠近中心管的一股为含粉量较多的浓煤粉气流;另一股为含粉量较少的淡煤粉气流,从浓煤粉气流外侧喷入炉膛。同时,二次风也分成旋流二次风和直流二次风两部分:旋流二次风从内二次风通道喷入炉膛;直流二次风从外二次风通道喷入炉膛。这样在旋流二次风和钝体的作用下,形成了中心回流区,浓煤粉气流在适当的位置喷入回流区内,形成高温、高浓度区。根据燃烧理论<sup>[4,5]</sup>,适当提高煤粉浓度可以缩短着火时间、降低着火热,提高了火焰稳定性。淡煤粉气流和旋流二次风在浓煤粉气流着火后依次与浓一次风混

收稿日期:1998-12-07;修订日期:1999-01-29

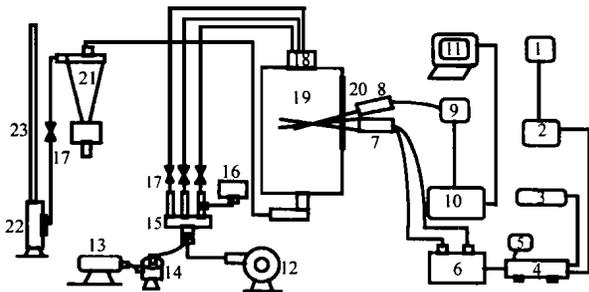
作者简介:李志强(1970-),男,北京清华大学工程力学系力博97班博士研究生,邮编 100084

合,保证了煤粉燃烧初期所需的氧,直流二次风则沿射程逐渐混入助燃,进一步提供煤粉燃烧至燃尽所需的氧,形成多层分级燃烧,能够有效地抑制 NO<sub>x</sub> 的生成。直流二次风不仅强化了燃烧射流的后期混合,将还原性气氛和炉墙隔开,防止高温腐蚀和水冷壁结渣;而且也起到了调节火焰外形的作用。

从工作原理可以看出,决定该燃烧器性能的主要因素有旋流叶片的开度、浓缩构件的浓缩分离作用和风量配比等,因此,我们需要对该燃烧器的各主要因素进行实验研究。

### 3 实验装置、实验内容与实验方法

实验系统如图 2 所示,它包括实验段、供气供粉



- 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. 鼓风机 13. 压气机
- 14. 振荡式供粉器 15. 分风道 16. 减速箱式供粉器
- 17. 阀门 18. 旋流煤粉燃烧器 19. 模拟炉膛 20. 平面玻璃
- 21. 旋风分离器 22. 引风机 23. 排气管

图 2 旋流煤粉燃烧器 PDPA 实验系统图

部分、排气分离部分和 PDA 测试部分。实验段包括燃烧器模型和模拟炉膛,模拟炉膛是直径  $\Phi = 800$  mm,高度  $H = 1500$  mm 的圆柱型筒体,其上部开一个高 1000 mm,宽 500 mm 的窗口,贴上平面玻璃,作为测量窗口;供气供粉系统由鼓风机、减速箱供粉器、频率振荡式供粉器、分风道和管道组成;排气分离系统由旋风分离器和引风机等组成;测量系统采用 DANTEC 公司生产的 PDA (三维相位多普勒颗粒分析仪)测量系统。

测试的主要内容包括在不同旋流叶片角度和配风比下燃烧器出口区域沿轴向各个截面上气固两相的轴向、切向及径向平均速度和脉动速度分布,颗粒浓度分布,中心回流区形状等。

实验中采用的气相示踪粒子是粒径范围在  $0 \sim 10 \mu\text{m}$  的二氧化钛 ( $\text{TiO}_2$  钛白粉);煤粉颗粒用玻璃微珠模拟,其球形度达 80%,折射率为  $1.5 \sim 1.55$ ,粒径范围为  $10 \sim 200 \mu\text{m}$  (大部分颗粒在  $40 \sim 70 \mu\text{m}$  之间)。共测量了四个工况,工况特点如表 1 所示。每一种工况沿实验段高度方向取几个测量截面,测量截面离燃烧器出口的距离为 10、110、210、360、510 mm,由于测量截面的对称性每个截面沿半径方向取 21 个测点,测点间距为 20 mm,测量中每个测点采样 1000 个数据,采样时间为 2 分钟。

### 4 实验结果及分析

分析实验结果时气相采用粒径为  $0 \sim 10 \mu\text{m}$  的颗粒作为示踪粒子,颗粒相采用  $50 \mu\text{m}$  和  $80 \mu\text{m}$  两组粒子,每组粒径宽度均为  $10 \mu\text{m}$ 。

表 1 工况特点

	扩口 角度	钝体 角度	一次风 浓缩构件	二次风 叶轮	一次风 率(%)	旋流二次风 量( $\text{m}^3/\text{h}$ )	旋流二次风量 占总风量比(%)	直流二次风量 占总风量比(%)
工况 1	$45^\circ$	$45^\circ$ 开槽	$60^\circ$ 叶轮 $30^\circ$ 挡板	$45^\circ$ 弧 形叶片	19.2	514	43.6	37.2
工况 2	$45^\circ$	$45^\circ$ 开槽	$60^\circ$ 叶轮 $30^\circ$ 挡板	$45^\circ$ 弧 形叶片	19.2	629	53.3	27.5
工况 3	$45^\circ$	$45^\circ$ 开槽	$60^\circ$ 叶轮 $30^\circ$ 挡板	$60^\circ$ 弧 形叶片	19.2	514	43.6	37.2
工况 4	$45^\circ$	$45^\circ$ 开槽	$60^\circ$ 叶轮 $30^\circ$ 挡板	$60^\circ$ 弧 形叶片	19.2	629	53.3	27.5

从图 3 可以看出,四种工况轴向平均速度分布的形状基本相同,大体上呈单峰值分布,不同尺寸颗粒相之间的滑移不太明显,但是气相和颗粒相之间有滑移。这种现象大概是由于颗粒的小粒径分布太少造成的。在回流区内,颗粒相滞后于气相;在回流区外,气相滞后于颗粒相。这是由于燃烧器出口中心区域粒径较大的颗粒占多数,平均粒径大,颗粒具

有较大的惯性的缘故。四种工况的轴向速度分布不仅在燃烧器出口区域中心轴线附近形成了较大的内回流区,而且在近壁面处也形成了较大的外回流区。表 2 所示的试验结果为不同工况下中心回流区的主要尺寸,以及由实测的燃烧器出口气流轴向及切向速度分布用近似积分法计算的实际旋流强度。通过分析可以得出以下结论:(1)旋流强度随旋流叶片开

度或旋流二次风量的增大而增大。  
 (2) 在一定的旋流叶片开度下, 随着旋流二次风量的增加, 回流区的范围稍微变长、变宽; 但是在旋流二次风量一定时, 随着

旋流叶片的开度由 45° 增加到 60°, 回流区的范围明显增大。显然, 旋流叶片开度 (即燃烧器的结构) 对回流区的影响比旋流二次风量的影响大。因此旋流叶片开度对回流区具有灵活有效的调节能力。  
 (3) 扩口和直流二次风可以有效地将燃烧器射流的扩展角限制在一定范围内, 与传统旋流燃烧器相比, 射流

的刚度增加, 具有较强的直流特性, 不会对邻近燃烧器射流的发展形成干扰, 并能保证燃烧后期的扰动与混合, 有利于煤粉的燃尽, 从而提高燃烧效率。另一方面, 直流二次风能够在火焰周围形成氧化气氛, 对防止结渣和高温腐蚀起着十分重要的作用。

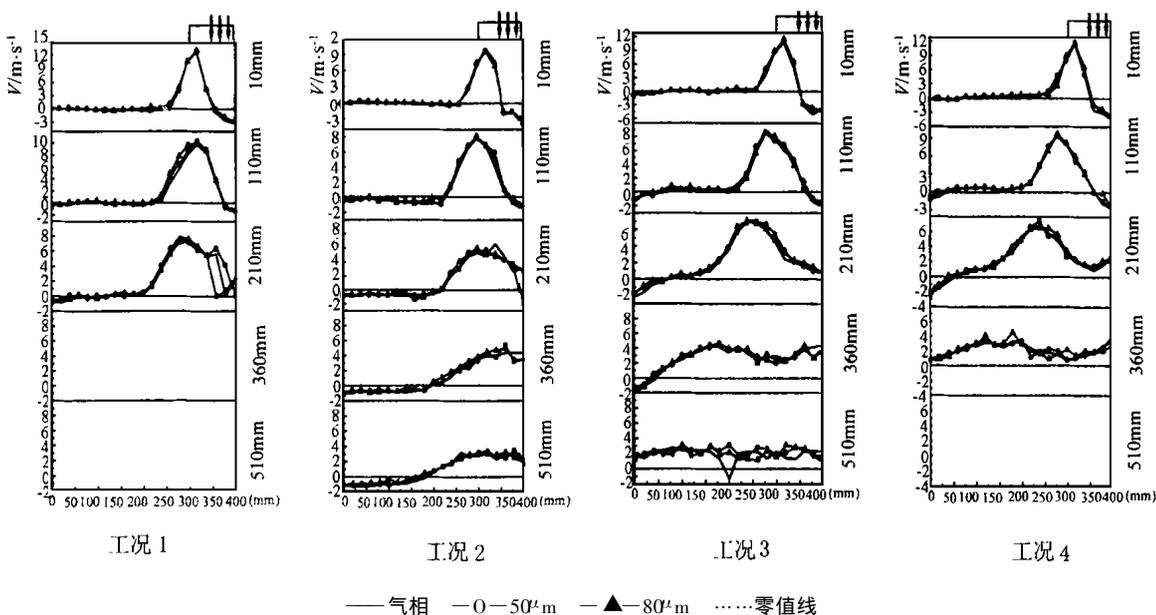


图 3 两相轴向平均速度分布

表 2 不同风量配比及旋流叶片开度下的测试结果

旋流叶片开度(度)	总风量 (m <sup>3</sup> /h)	旋流二次风占总风量比(%)	直流二次风占总风量比(%)	计算的 actual 旋流强度(Ω)	回流区长度与一次风管内径之比	回流区宽度与一次风管内径之比
45°	1180	43.6	37.2	0.145	1.319	0.879
		53.3	27.5	0.185	1.359	0.934
60°	1180	43.6	37.2	0.414	1.688	1.011
		53.3	27.5	0.457	1.743	1.055

从两相轴向脉动速度分布图 4 可以看出, 在射流扩展角内, 两相脉动速度均较大, 而且普遍形成双峰值分布; 随着射流的发展, 脉动分布趋于平缓。这

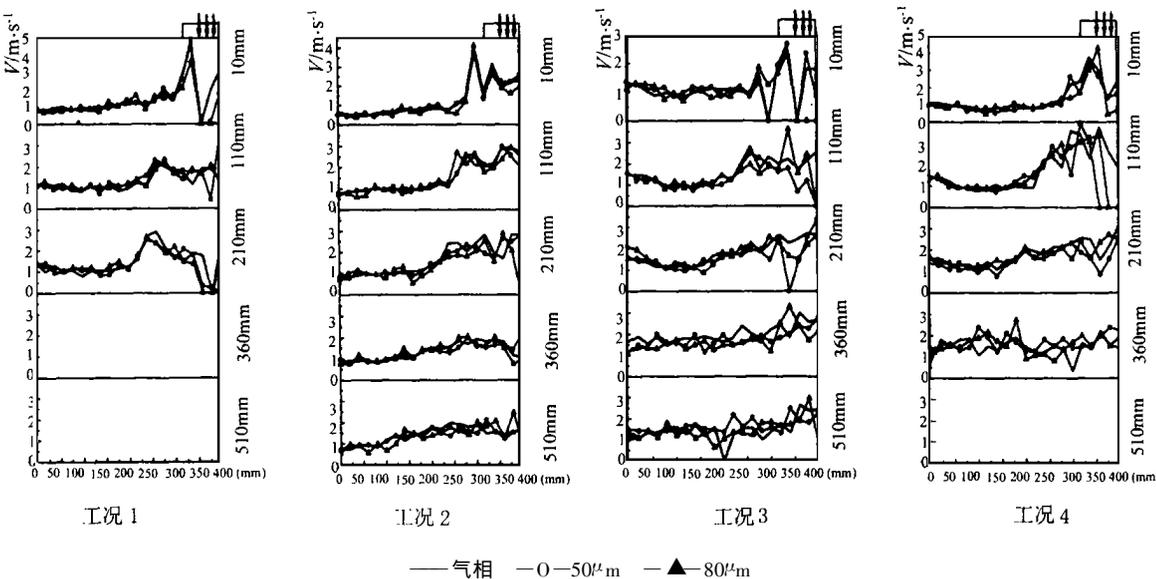


图 4 两相轴向速度脉动分布

种现象形成的原因是由于在燃烧器出口附近受燃烧器结构和旋流二次风的影响, 形成了较大的速度梯度; 而流场下游部分的速度梯度则明显减弱。

从图 5 可以看出, 在离燃烧器出口一定距离内, 四种工况气固两相的切向速度均呈典型的 Rankine 涡结构。中部比较窄的区域是似固核区, 外围很大的区域是自由涡区。在似固核区, 固相和气相之间有一定的滑移。在自由涡区, 两相之间几乎无滑移。随着射流的发展, 似固核区逐渐减弱, 位涡逐渐增大, 但是大颗粒的减弱稍慢, 这说明颗粒惯性对流场

的影响较大。

燃烧器出口区域内的两相径向速度如图 6 所示。从径向速度分布可以看出, 四种工况在距中心轴线较大范围内的径向速度均为负值, 即气固两相存在向燃烧器中心轴线流动的现象。这表明在该区域中一次风粉流流向了中心回流区, 从而使射流中心区域的颗粒浓度增加, 有利于缩短着火时间、进行缺氧燃烧、降低  $NO_x$  的生成, 并且较强的径向穿越能力强化了燃烧区的扰动, 有利于燃料的燃尽。

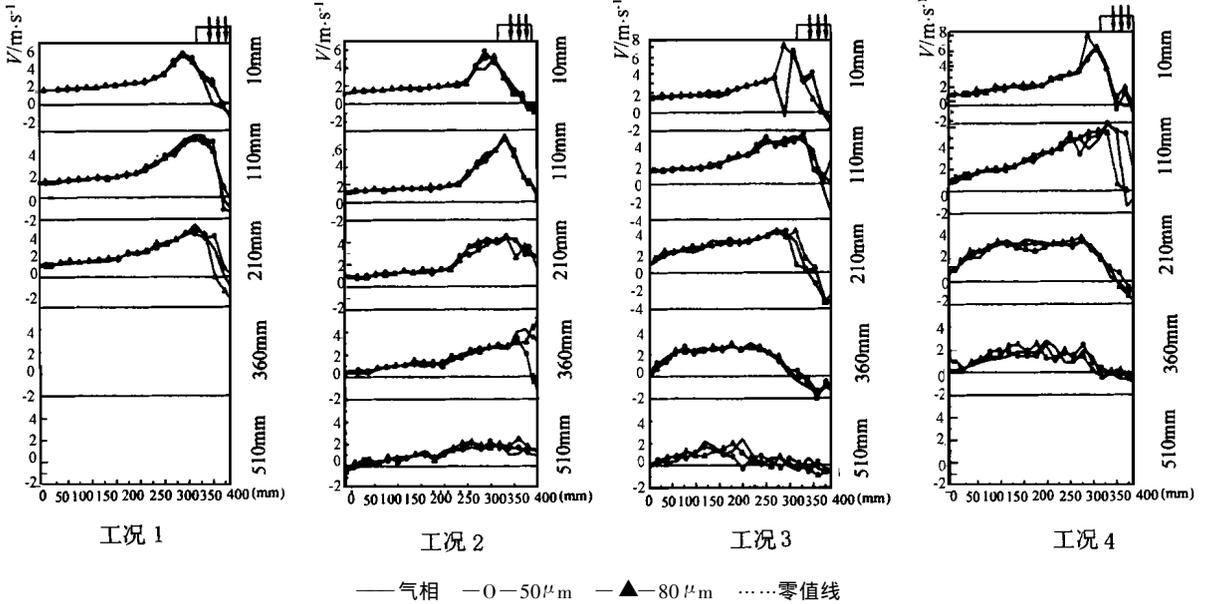


图 5 两相切向平均速度分布

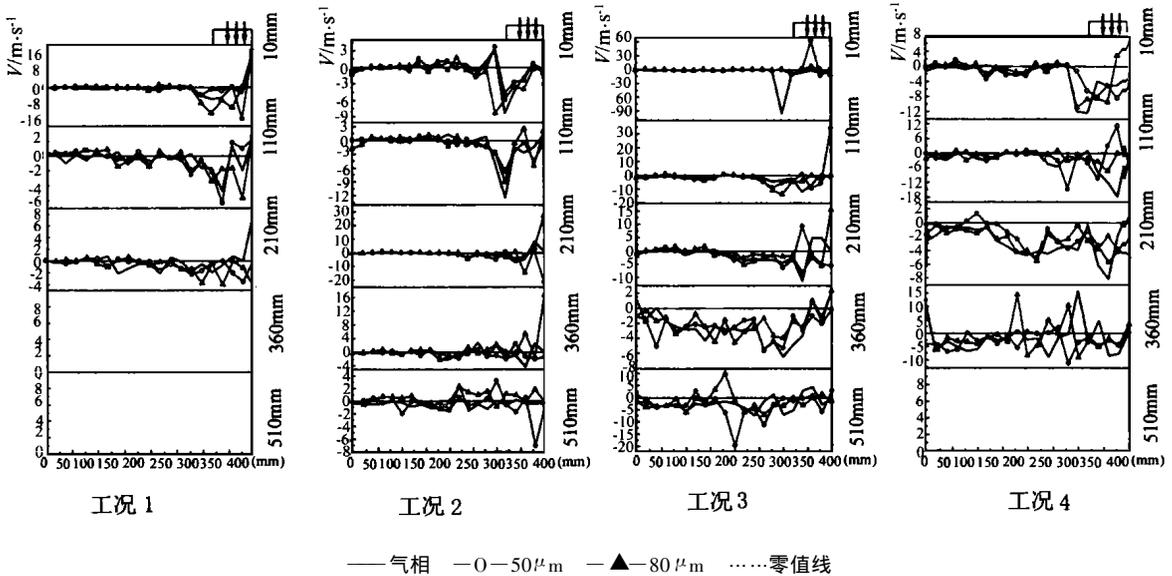


图 6 两相径向平均速度分布

从浓度分布图 7 可以看出, 浓度分布的峰值随着射流的发展逐渐向边壁移动, 并且逐渐趋于平缓。另外, 针对同一旋流叶片开度, 随着旋流二次风率增大、直流二次风率减小, 浓度分布向边壁移动加快。

在燃烧器出口附近, 浓度峰值位于中心回流区内, 这为煤粉的加热升温创造了条件, 实现了富燃料燃烧。同时随着射流的发展, 浓度峰值逐渐向边壁移动, 有利于旋流二次风、直流二次风依次混入助燃, 符合随

燃烧过程的发展逐渐供给助燃空气的燃烧机理。

### 5 结 论

通过对旋流浓淡煤粉燃烧器不同工况下出口区域两相流动特性的实验研究与结果分析, 可以得出如下结论:

(1) 旋流浓淡煤粉燃烧器出口区域两相速度均在轴线附近形成较大的回流区, 而且在近壁处也形成了较大的回流区;

(2) 在一定的旋流叶片开度下, 随着旋流二次风风量的增大, 回流区稍微变长、变宽;

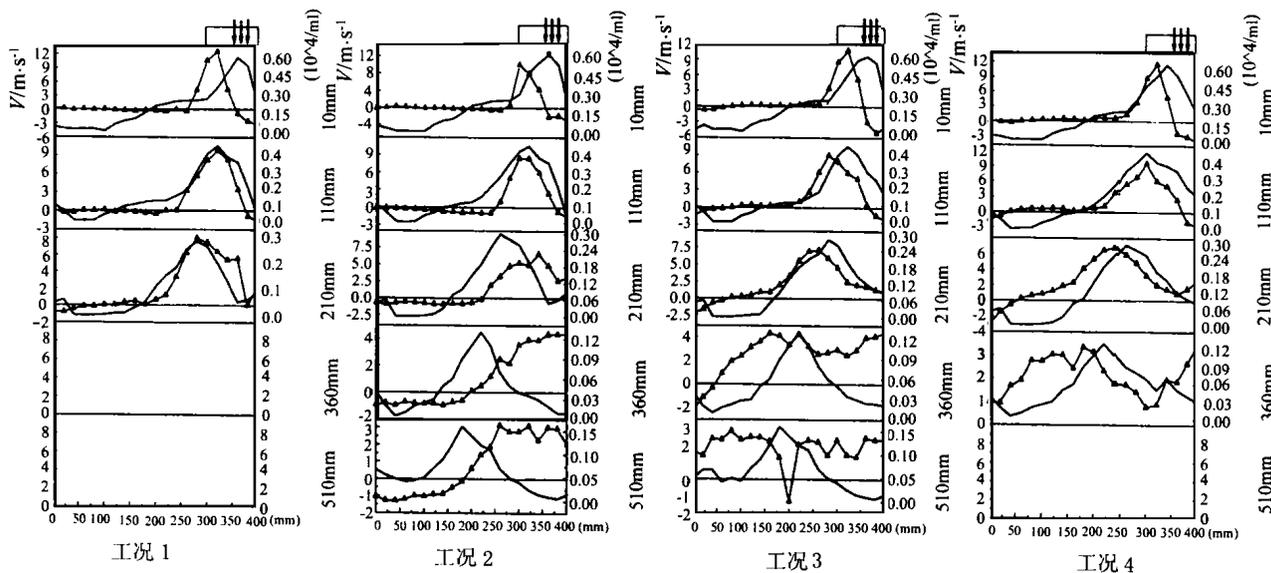
(3) 在一定的旋流二次风量下, 随着旋流叶片的开度由 45° 增加到 60°, 回流区的范围明显增大;

(4) 扩口和直流二次风可以有效地将射流扩展角限制在一定范围内, 能够保证射流的刚度;

(5) 两相流场中气相和颗粒相的切向速度均呈典型的 Rankine 涡结构;

(6) 在射流扩展角内, 两相径向速度均有向中心轴线流动现象;

显然, 通过适当选择旋流叶片开度、旋流二次风和直流二次风的配比, 在多变煤种和多变负荷下, 能够实现提高燃烧效率、稳定燃烧和降低 NO<sub>x</sub> 生成的目标。因此, 这种燃烧器具有广泛的应用前景。



(—▲— 轴向速度    —■— 颗粒浓度    ..... 零值线)  
图 7 轴向平均速度与颗粒相对体积浓度分布

### 参 考 文 献

[1] 李荣先, 崔龙铉, 周力行, 罗纲, 张斌. 轴向叶片式旋流煤粉燃烧器出口区域两相流场的 PDA 研究. 中国工程热物理学会燃烧学学术会议, 1997.

[2] 李荣先, 崔龙铉, 周力行, 罗纲, 李志强. 旋流煤粉燃烧器出口区域两相流场的 PDA 实验研究. 高校工程热物理研究会第七届全国学术会议, 1998.

[3] 李志强, 李荣先, 崔龙铉, 周力行. 旋流煤粉浓淡燃烧器出口区域两相流场的 PDA 实验研究. 中国工程热物理学会燃烧学学术会议, 1998.

[4] 曾汉才. 高浓度煤粉燃烧的理论及技术. 华中电力, 1991(1).

[5] Sakai M et al. Tangential corner fired boiler with low volatilia matter content coal. *Technical Review*, 1986.

(渠 源 编 辑)

(上接 442 页)

### 参 考 文 献

[1] Levoy M. Display of surfaces from volume data. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1988, 8(3): 29~37.

[2] Gitta O Domik. Visualization Education. *Computer & Graphics*, 1994, 18(3): 277~280.

[3] 唐泽圣. 科学计算可视化与三维空间数据场显示. 计算机世界报, 1993 年 3 月 3 日.

[4] 石教英, 蔡文立. 科学计算可视化算法与系统. 科学出版社, 1996.

[5] 李介谷, 施鹏飞等. 图象处理技术. 上海交通大学出版社, 1990.

[6] 朱茂殊. 流场的层析干涉测量及计算机可视化研究. [硕士学位论文] 武汉: 华中理工大学, 1997.

(复 编)

**Device for Pulverized Coal-fired Boilers** [刊, 中] / Liu Shengyong, et al (Key Laboratory of Renewable Energy Sources under the Ministry of Agriculture) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 447~449

This paper expounds in detail the design and calculation of nozzles, injectors and burner cones of a liquefied petroleum gas-based ignition device for pulverized coal-fired boilers as well as ways and means for flame stabilization. Application results show that such ignition devices feature a high flame temperature, good adaptability in operation and ease of use, etc. They have broad prospects for use in utility boilers that consume no oil or only a limited amount of oil for ignition. **Key words:** pulverized coal-fired boiler, liquefied petroleum gas, forced pre-mixing, ignition device

**旋流浓淡煤粉燃烧器出口区域气固两相流动特性的实验研究 = Experimental Study of Gas-Solid Dual-phase Flow Characteristics at the Outlet Zone of a Dense-dilute Pulverized Coal-fired Swirl Burner** [刊, 中] / Li Zhiqiang, Li Rongxian, et al (Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 450~454

With the help of a three-dimensional phase Doppler particle analyzer an experimental study was conducted of the dual-phase flow characteristics at the outlet zone of a dense-dilute swirl burner. As a result, obtained are the distribution relationship of gas-solid dual-phase flow field and concentration field of the said burner under various degrees of openness of swirl blades and at different ratios of swirl secondary air and direct-flow secondary air. In addition, an analysis is also conducted of the above distribution relationship. **Key words:** dense-dilute pulverized coal-fired swirl burner, gas-solid dual-phase flow, three-dimensional Doppler particle analyzer (PDA), swirl blade openness, air flow rate proportioning

**浓淡型双调风旋流燃烧器低 NO<sub>x</sub> 特性分析 = An Analysis of the Low NO<sub>x</sub> Emission Feature of a Dense-dilute Dual-channel Swirl Burner** [刊, 中] / Yu Zhanying, Jiang Hongli, Tan Houzhang, et al (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 455~457

An experimental study is conducted of a dense-dilute dual-channel swirl burner with the help of cold-state isothermal simulation technology. On the basis of the test results the structure and features of such a burner are analyzed and a study is conducted of the characteristics of a stepped air-feed and dense-dilute combustion techniques. In addition, the major role played by a combustion stabilization ring has also been investigated. All the above has led to a better understanding of the mechanism of low NO<sub>x</sub> emission and partial load flame-stabilization of the dual-channel swirl burner. **Key words:** dual-channel swirl burner, low NO<sub>x</sub> emission, flame stabilization, experimental investigation

**带纵肋环烟管流动与传热实验研究 = An Experimental Study on the Flow and Heat Transfer in Annular Flue Gas Pipes with Longitudinal Ribs** [刊, 中] / Wang Huaibin, Du Jun, et al (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 458~460

A new type of flue gas pipe fitted with longitudinal internal ribs and featuring an intensified convection heat exchange is proposed by the authors for use on an oil-field heating boiler. An experimental study was performed of its flow and convection heat exchange with a criterion equation of heat exchange being given. **Key words:** longitudinal rib, annular flue gas pipe, convection heat exchange

**声波吹灰器的研制 = Development of a Sonic Soot Blower** [刊, 中] / Li Qiang, Sun Cengrun, Xuan Yimin (Nanjing University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 461~462

Based on the principle of hydrodynamics and acoustic resonance the authors have developed a sonic soot blower for use on heat exchangers. A relevant experimental test has been performed of its acoustic intensity performance. The experimental test and industrial application results show that the sonic soot blower under discussion can effectively remove soot deposits from heat exchangers. **Key words:** boiler, heat exchanger, sonic wave, sootblowing

**一种汽轮机转子的热应力测试系统 = A Test System for Measuring Thermal Stresses in Turbine Rotors** [刊, 中] / Gao Jingbo, Wu Xinhua, Xia Songbo, et al (Harbin Institute of technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 463~464

This paper focuses on a new system for measuring turbine rotor thermal stresses. The use of a difference measur-