

旋涡式低温煤粉燃烧器的实验及其数值研究

祝 波, 汪小慈, 阎常锋, 赵黛青

(中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640)

摘 要: 基于空气分级燃烧降低氮氧化物的原理和流场组织, 设计了一种低 NO_x 型低温旋涡煤粉燃烧器, 采用实验和数值方法对其流场特性进行了研究。结果表明, 在燃烧器下部存在强烈的旋流区, 能够形成空气分级所要求的还原区和燃尽区, 一二次风的进风位置和进风方式对流场的组织存在优化的配比选择; 基于 $\text{RNG}k-\epsilon$ 模型的燃烧器内两相流运动的数值模拟再现了流场的实验结果, 反映了不同尺寸颗粒在分区气流场内的运动规律。

关 键 词: 旋涡燃烧器; 煤燃烧; 空气分级; 降低 NO_x

中图分类号: TK16; O643.21 文献标识码: A

1 前 言

我国能源构成以煤炭为主, 约占 75%, 煤炭的过度消费已成为我国大气污染的最主要起因。除了火力发电以外, 我国存在大量的低效率、技术落后的锅炉和工业窑炉等燃煤设备, 其也是主要的污染源。这些设备由于规模小而分散, 采用烟气后处理的方法通常是不经济的, 通过研发和推广高效低污染的燃烧设备, 实现燃烧过程中污染物的生成控制是目前紧迫的任务。

Hartmut 等人比较了空气分级和再燃烧方法降低 NO_x 的效果^[1], 探讨了煤种、温度、停留时间和过量空气系数等影响因素, 结果表明燃用褐煤时采用空气分级抑制 NO_x 比较有效, 燃用粉末状的烟煤时采用再燃烧抑制 NO_x 要优于空气分级方法; 周力行等人研究了喷腾式旋风炉^[2~3], 通过形成粗大颗粒在有强烈回流的喷腾段贫氧燃烧, 细颗粒在旋风段过氧燃烧能够实现粗粒劣质煤在较低温度下的高效、低 NO_x 燃烧; 聂森等人发明的沸腾式涡旋燃烧方法通过在炉膛下部形成环形沸腾燃烧以及在炉膛上部形成涡旋燃烧^[4], 也能够达到提高热效率、降低

氮氧化物排放的目的; Nishimura 等人研究的新型再循环燃烧器^[5], 使燃料与一次气流的轴线方向呈一定角度喷入燃烧器, 再由燃烧器下部喷入的完全燃烧用二次空气是通过一定张角的喷孔喷入, 在炉膛内形成空气两级燃烧抑制 NO_x 生成。

本文基于空气分级燃烧降低氮氧化物的原理和流场组织^[6], 设计了一种低温旋涡煤粉燃烧器, 原理如图 1 所示。通过采用在绕水平轴强烈旋转的还原区内的低温贫氧燃烧、缩短在过氧燃尽区的停留时间等途径, 达到提高燃烧效率、拓宽煤种适应性、降低氮氧化物排放的目的。本文采用实验和数值模拟方法对低温旋涡煤粉燃烧器进行了冷态研究, 为开发高效低污染煤粉燃烧器取得不少有价值的数据和拓宽设计思路。

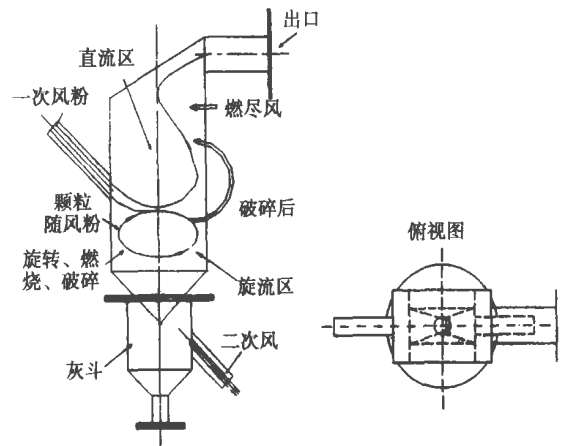


图 1 燃烧器原理图

2 冷态流场测试

燃烧器模型如图 2 所示, 模型由有机玻璃制成,

收稿日期: 2005-02-02; 修订日期: 2005-05-27

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(000967); 广东省科技计划基金资助项目(202B30803)

作者简介: 祝波(1980-), 男, 河南孟津人, 中国科学院广州能源所硕士研究生。http://www.cnki.net

测量坐标原点设在前壁面上 (X 垂直纸面, 方向向里), 燃烧器主体的结构尺寸 $300\text{ mm} \times 680\text{ mm} \times 200\text{ mm}$, 燃烧器出口尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, 一、二次风管直径均为 50 mm 。为了考查一、二次风风量大小对流场的影响, 选取了一、二

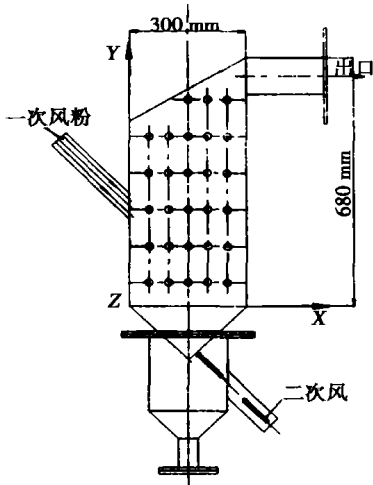


图 2 燃烧器冷态模型

次风管与水平成 45° 平行反向相吹的 3 个实验工况, 如表 1 所示。对于每个工况, 采用五孔探针进行三维速度场的测量^[7], X 方向布置测点 5 个, Y 方向 6 个, Z 方向 9 个, 共计 270 个。

表 1 实验条件

	Q_1 $/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Q_2 $/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Q_1/Q_2	u_1 $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	u_2 $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	T $/\text{K}$
工况 1	44	78	0.6	6	10	298
工况 2	44	56	0.8	6	7.5	298
工况 3	61	78	0.8	8	10	298

注: Q_1 —一次风风量; Q_2 —二次风风量; u_1 —一次风风速; u_2 —二次风风速; T —实验环境温度

2.1 燃烧器冷态流场分布

图 3 给出了工况 1 下几个典型截面的速度矢量分布, 其中图 3(a)和图 3(b)分别是 $Z=25\text{ mm}$ 、 100 mm (Z 向中面)处 XY 方向的速度矢量分布, 图 3(c)是 $X=100\text{ mm}$ 处 YZ 方向的速度矢量分布。

从测试结果可以看出, 气流从一、二次风口进入燃烧器后, 燃烧器下部形成旋涡区, 当具有一定粒径分布的煤粉随一次风进入燃烧器后, 旋流场会带动粗大煤粉不断旋转、燃烧、破碎, 从而增加颗粒在该区域的停留时间, 为了限制氮氧化物的形成, 一、二次风与煤粉的配比是过量空气系数小于 1, 旋涡区设计为还原气氛。比较图 3(a)和图 3(b)可以看出, 在靠近燃烧器中心部分 (如 $Z=100\text{ mm}$ 处), 二次风与一次风形成交错射流, 交错射流形成的旋转流方向取决于两股射流动量的矢量和, 燃烧器下部形成的刚性中心旋流, 使得二次气流难以穿透一次气流

的核心区; 此外, 如图 3(b)所示, 在旋流的上部且 Z 向中面附近形成了一个速度滞止区, 二次风的流出主要是绕过此速度滞止区从壁面附近的狭窄区域通过 (如 $Z=25\text{ mm}$ 处)。从图 3(c)也可以清楚地看到位于旋流区上方的速度滞止区, 呈“环核状”。“速度滞止区”对于燃烧特性的影响在 3.3 节通过数值模拟对其成因等做了分析。

2.2 进风参数对流场的影响

由于一次风和旋流二次风的动量对比对燃烧器内流场的组织有直接影响, 本实验重点研究了不同工况下燃烧器的流场特性。根据文献[8]研究成果, 一次风和二次风的交叉射流轨迹有以下规律:

$$y/d = cJ^a (x/d)^b \quad (1)$$

式中: d —射流形状尺寸, 如直径、边长等; J —二次风和一次风的动量比, 即 $J = \rho v_2 / \rho v_1$; a 、 b 、 c —由实验确定的经验常数。

图 4 给出了中面 ($Z=100\text{ mm}$)上的 $X-Y$ 方向速度合成矢量的分布。从工况 1 与工况 2、工况 1 与工况 3 的比较可以看出, 随着二次风风速的减小或者一次风风速的增大, 燃烧器中心旋流区面积不断减小, 由式 (1) 分析可知, 这主要是动量比 J 的减小所致; 工况 2 与工况 3 的 Q_1 、 Q_2 值不同, 即一次风和二次风的喷入速度不同, 由于动量比 J 值保持不变, 虽然旋流的强度不同, 但旋流区形状受到的影响却很小。

对于本文提出的旋流低温燃烧器, 旋流区的大小和强度是设计的关键参数。在对 30 目石英砂颗粒 ($d_p=0.59\text{ mm}$) 的示踪实验中发现, 在固定一次风流量 $Q_1=44\text{ m}^3/\text{h}$ 的条件下, 二次风流量 Q_2 在 $56\sim78\text{ m}^3/\text{h}$ 范围内时, 燃烧器内部能够形成稳定的旋流, 颗粒随气流做旋转运动。当 $Q_2 < 56\text{ m}^3/\text{h}$ 时, 难以形成稳定的旋流, 有较多颗粒堆积在二次风进风口; 当二次风的流量超过 $78\text{ m}^3/\text{h}$ 以后, 颗粒随一次风进入燃烧器后停留时间很短, 很快被气流带往出口。因此, 在实际燃烧器的设计过程中, 进风参数的选取相当重要, 二次风和一次风要有足够的动量比以保证能形成较大面积的气体旋流区, 提供颗粒克服重力和阻力的动量; 另外, 二次风动量不能过大, 二次风过大会导致颗粒随高速的二次风直接流向燃烧器出口, 不进入旋流区, 难以形成正常燃烧。

3 燃烧器内气固两相流场的数值分析

从冷态流场的实验结果可知, 流场旋涡结构是

燃烧器设计和运行成功的关键。本节首先对燃烧器的冷态气相流场进行数值模拟, 并与实验结果相比较, 然后对气固两相流场的旋涡特性以及颗粒的运动特性进行分析, 探讨了燃烧器的设计优化。

3.1 计算方法及边界条件

本文以热流体计算软件 STAR-CD 为计算平台, 采用 RNG $k-\epsilon$ 模型对燃烧器的流场进行了模拟^[9]; 采用分块结构化网格进行计算, 其网格精度由数值解的网格无关性确定。各控制方程中对流项和扩散项的离散均采用 STAR-CD 特有的二阶精度 MARS 格式^[10], 压力与速度的耦合采用 SIMPLE 算法, 利用多重网格法加速收敛。

根据前面的实验研究, 计算条件选择工况 1, 即一、二次风进口气流速度分别为 6 m/s 和 10 m/s , 入口湍流强度 $I=0.05$ ^[11], 出口截面按充分发展条件处理; 固体壁面为无滑移条件, 按壁面函数法处理 k, ϵ ^[12]。

3.2 计算结果和实验结果的对比

图 5 给出了 $Z=25\text{ mm}$ 截面处, 沿 Y 方向 u, v 速度的分布, 与工况 1 的实验数据比较可以看出, 数值计算结果较好的再现了实验测试得到的流场特性, 但在近壁处、速度变化很大的某些区域内相差较大, 分析其原因主要有: (1) 五孔探针插入流场进行测试, 对流场会产生一定干扰, 近壁面处的强旋流也使得五孔探针难以准确判断局部的主流方向, 影响

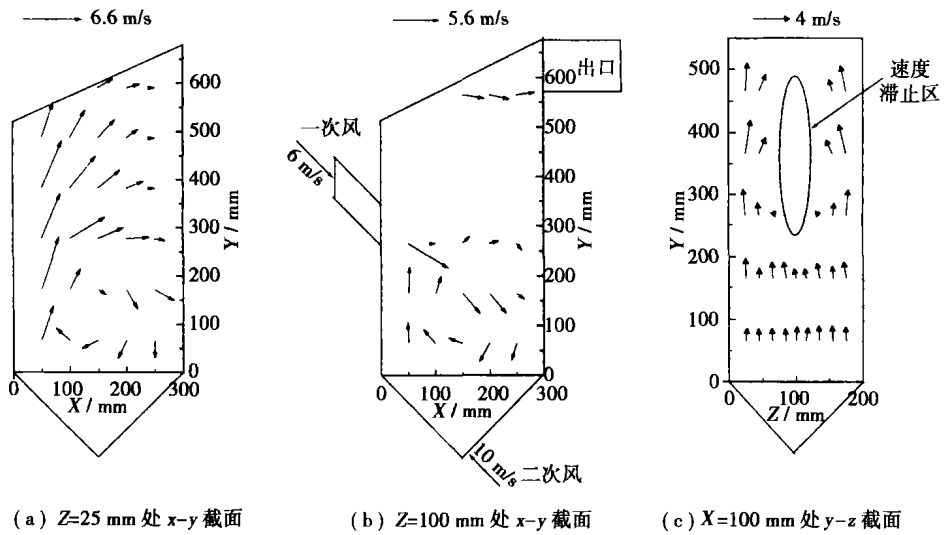


图 3 燃烧器流场速度矢量分布

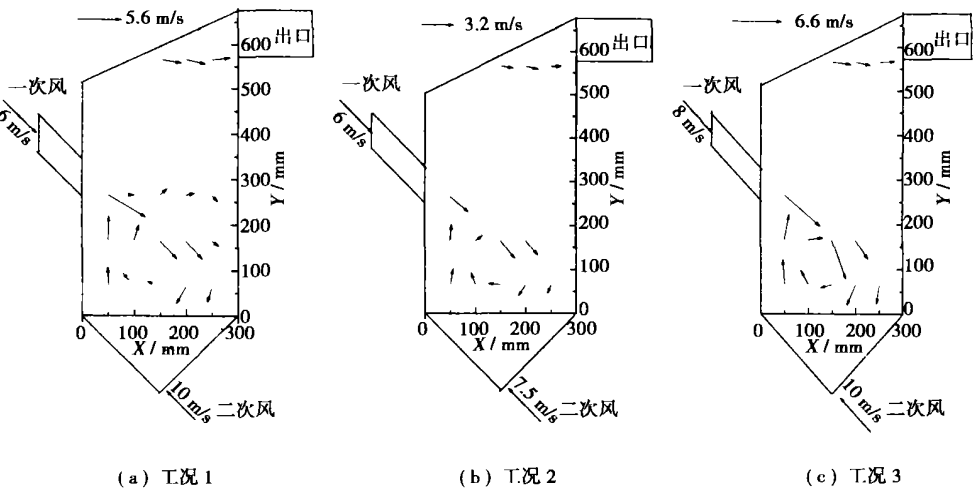


图 4 进风参数对燃烧器流场的影响

测量精度; (2) 计算中采用的 RNG $k-\epsilon$ 模型虽然部分地考虑了湍流脉动的各向异性, 但从本质上看它仍是一种建立在各向同性涡粘性假设基础上的标准 $k-\epsilon$ 模型的改进形式, 不能够完全再现交错射流产生的旋转流特征^[9]。根据以上比较和分析, 本文认为数值计算的结果用于判断和讨论燃烧器内流体力学特性是合理可行的。

3.3 旋涡特性及颗粒的运动轨迹

本文在工况 1 条件下, 对 0.2 mm 、 0.5 mm 、 1.0 mm 直径的颗粒运动轨迹进行了数值模拟, 颗粒质量流量为总风量的 $1/7$, 为 57.6 kg/h , 其投入位置沿一次

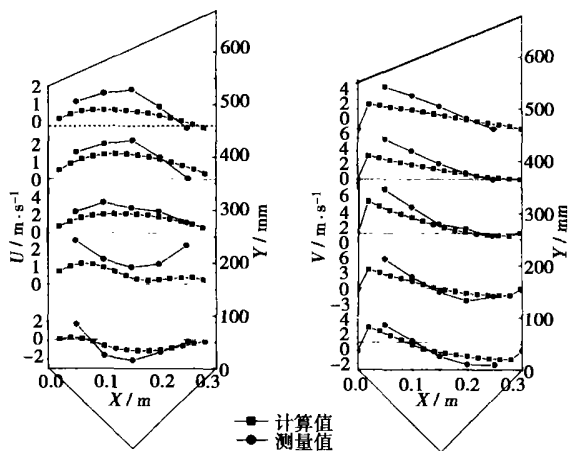


图 5 U、V 速度沿 Y 方向的分布(Z=25 mm)

风进口圆周方向均布, 共 50 组。颗粒在流场中的运动采用随机轨道模型, 气固两相耦合求解, 计算中考虑了颗粒在气流中受到气体拖曳力、重力、压力梯度力以及虚拟质量力。

图 6~图 8 分别给出了不同粒径颗粒在燃烧器内的运动轨迹。从图 6 中可以看出, 颗粒直径较小时, 颗粒不进入旋流区而被流出气流带向燃烧器出口, 未吹出的颗粒落下后, 再次被二次风带向出口。颗粒较大时(见图 8), 气流携带颗粒在燃烧器的下部旋转, 停留时间较长; 从 Y-Z 投影面还可以看出, 颗粒在随气流旋转的同时, 会逐渐被气流带到壁面。图 9 和图 10 是 X-Y 截面和 Y-Z 截面的气流场分布, 如图所示由于“环核状”速度滞止区的存在, 二次风不能从一次风的射流核心区通过, 而是绕过核心旋流区沿壁面高速流向燃烧器上方和出口, 达到壁面后落下的颗粒, 由二次风再度吹起, 或再度随气流旋转, 或被带向燃烧器的上

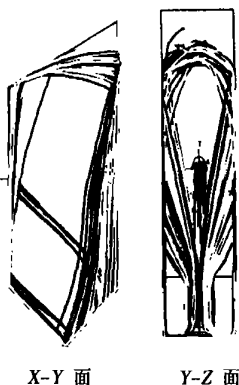


图 6 0.2 mm 颗粒运动轨迹



图 7 0.5 mm 颗粒运动轨迹

部, 进入完全燃烧区, 滞止区的存在实际影响了二次风和旋流区很好的混合。

根据图 8 所示, 带入上部的大颗粒由于受到重力作用, 从燃烧器的上部又回落到旋涡中, 但从 0.2 mm、0.5 mm 的颗粒轨迹看, 有不少颗粒没有进入旋流区, 直接被气流带出燃烧器, 这一现象意味着现有的流场结构无法保证中小煤粉在旋流区有足够的停留时间。针对这个弊端, 在一次风进口附近增设了左右两个风口, 将进风均布在进口面上, 以此抑制二次风直接沿壁面流向出口, 强迫二次风转向进入旋流场, 加强对颗粒的导向。图 11 是改进前后 0.2 mm 颗粒的计算结果, 改进后流场中 0.2 mm 颗粒大部分进入旋流区随气流旋转, 颗粒在旋涡区的停留时间可显著提高。

4 结 论

通过对低温煤粉燃烧器内三维气固两相流场的实验和数值研究, 较好地把握了流场特性以及有利于燃烧完全和低 NO_x 生成的重要影响要素, 为下一阶段的热态研究提供了实验指导和分析依据, 所得结论如下:

- (1) 燃烧器下部形成旋流区, 通过对供风风量的调整, 可以保证形成空气分级燃烧降低 NO_x 排放所需的还原区和燃尽区, 但在燃尽区中间存在

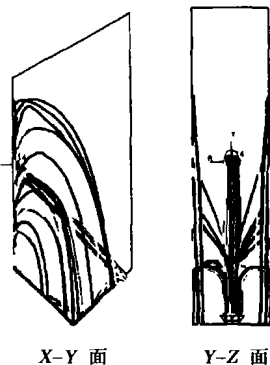


图 8 1.0 mm 颗粒运动轨迹

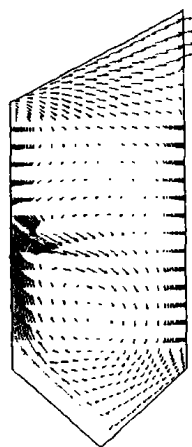


图 9 X-Y 截面中心流场分布

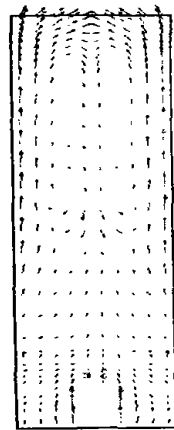


图 10 Y-Z 截面中心流场分布

一个气流速度极低的滞止区;

(2) 通过对一、二次风量大小调整的比较, 发现为了保证旋流区的形成, 一、二次风风量比有一个最低值, 低于这个值就难以在燃烧器内部形成有效的旋流区, 将无法保证煤粉的稳定和完全燃烧。

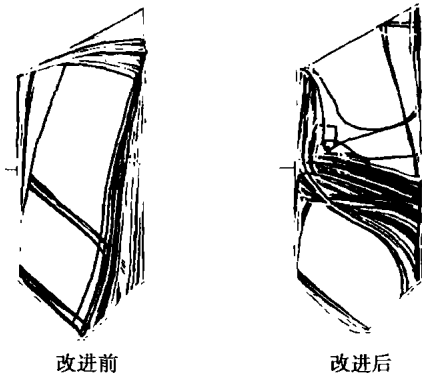


图 11 改进前和改进后的颗粒运动轨迹($d=0.2\text{ mm}$)

(3) 基于 STAR-CD 软件, 采用 RNG $k-\epsilon$ 模型对燃烧器内部流场进行了模拟, 计算结果基本反映了燃烧器内的流体动力学特性和变化规律。

(4) 通过改变一次风粉的单管进口方式为均布进风, 可以增加小颗粒在旋涡区内的停留时间, 提高燃烧器对不同粒径煤粉燃料的适应性。

(上接第 500 页)

4 结 论

(1) 循环流化床脱硫技术采用直旋流复合流化方式时, 脱硫系统的锅炉负荷适应性提高。

(2) 直旋流复合流化时, 近壁处的切向速度最高。气固滑移切向速度比文丘里管直流流化有明显的提高。

(3) 直旋流复合流化的循环流化床脱硫塔的湍动强烈, 脱硫塔内颗粒浓度比文丘里管直流流化时高, 流化床内循环有了较大的增强, 这都有利于脱硫效率的提高。

参考文献:

[1] 赵旭东, 高继慧, 吴少华, 等. 干法、半干法(钙基)烟气脱硫技术研究进展及趋势[J]. 化学工程, 2003, 31(4): 64-67.

参考文献:

- [1] HARTMUT SPLIETHOFF, ULRICH GREUL, HELMUT RUDIGER, *et al.* Basic effects on NO_x emissions in air staging and reburning at a bench-scale test facility[J]. *Fuel*, 1996, 75(5): 560-564.
- [2] 周力行, 李荣先. 喷腾旋流固排渣煤燃烧方法及装置[P]. 中国专利: 92101967. X, 1992.
- [3] WANG D X, MA Z H, WANG X L, *et al.* Experimental studies on gas-particle flow and coal combustion in new generation spouting-cyclone combustor[J]. *J of Thermal Science*, 1995, 5(2): 132-137.
- [4] 聂森. 沸腾式涡旋燃烧方法及装置[P]. 中国专利: 93106089. 3 1993.
- [5] NISHIMURA M, SUZUKI T, NAKANISHI, *et al.* Low- NO_x combustion under high preheated temperature condition in an industry furnace[J]. *Energy conversion*, 1997, 38(10-13): 1353-1363.
- [6] 钟北京, 徐旭常. 低 NO_x 煤粉燃烧器的设计原理[J]. 动力工程, 1995, 15(5): 18-23.
- [7] 金志刚. 燃气测试技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 1994.
- [8] 徐明厚, 胡平凡, 韩才元. 受限空间中两相交射流穿透及混合特性研究[J]. 华中科技大学学报, 1996 24: 85-87.
- [9] YAKHOT VICTOR, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory[J]. *J of Scientific Computing*, 1986, 1(1): 1-51.
- [10] CD ADAPCO GROUP. STAR-CD version 3. 15 user guide[M]. Tokyo: Computational Dynamics Limited, 2001.
- [11] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.
- [12] WANG X, CHENG L. Three-dimensional simulation of a side discharge into a cross channel flow[J]. *Computers & Fluids*, 2000, 29(4): 415-433.

- [2] 张凤兰, 程岩. 小龙潭电厂引进烟气循环流化床一悬浮吸收脱工艺[J]. 云南电力技术, 2001(1): 23-25.
- [3] 董勇. 双循环流化床烟气悬浮脱硫工艺[J]. 电站系统工程, 2002, 18(6): 9-10.
- [4] MOORTEEL VAN DEN T, AZARIO E, SANTINI R, *et al.* Experimental analysis of the gas-particle flow in a circulating fluidized bed using a phase doppler particle analyzæ[J]. *Chemical Engineering Science*, 1998, 53(10): 1883-1899.
- [5] 董勇. 烟气脱硫循环流化床内物料分离循环的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
- [6] 张凡, 王军方, 王凡, 等. 半干法钙基烟气脱硫技术[J]. 能源环境保护, 2004, 18(1): 44-47.
- [7] 赵卷, 张少峰, 张占锋. 半干法烟气脱硫技术研究新进展[J]. 河北工业大学学报, 2003, 32(5): 81-86.
- [8] 赵旭东, 吴少华, 马春元, 等. 循环流化床烟气脱硫中过湿现象的实验研究与分析[J]. 动力工程, 2002, 22(3): 1815-1818.

composite fluidization mode, which can adapt to boiler load variation. Moreover, a PDA (Phase Doppler Anemometer) measurement system was employed to test the gas-solid two-phase flow field under this kind of fluidization mode. As a result, the gas-solid tangential speed and concentration distribution were obtained under the condition of a change in swirl airflow and an imaginary tangential radius in the circulating fluidized bed. Test results indicate that the tangential velocity in the composite-fluidization circulating fluidized bed will increase with an increase in radius and the gas-solid tangential slip speed is higher than that of the straight flow fluidization. There will also be an increase in concentration in the desulfurizer and a higher intensity in internal circulation, resulting in a corresponding increase in desulfurization efficiency.

Key words: circulating fluidized bed, composite fluidization, tangential velocity, internal circulation

旋涡式低温煤粉燃烧器的实验及其数值研究 = **Experimental and Numerical Study of a Swirl-type Low-temperature Pulverized-coal Burner** [刊, 汉] / ZHU Bo, WANG Xiao-han, YAN Chang-feng, et al (Guangzhou Institute of Energy Conversion under the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, China, Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(5). — 501 ~ 505

Based on the principle and flow field organization of air staged combustion aimed at reducing NO_x emissions the authors have designed a swirl-type low-temperature pulverized-coal burner featuring low NO_x emissions. By employing an experimental and numerical method a study was conducted of its flow field characteristics. The results of the study indicate that there is at the lower portion of the burner an intensive swirl flow zone, which can contribute to the formation of a reduction and burn-out zone required by the grading of air. As regards the primary and secondary air feeding location and mode there exists for the flow field organization an optimized proportioning option. The numerical simulation of a two-phase flow motion in the burner based on a RNG $k-\epsilon$ model has reproduced the experimental results of the flow field, reflecting the motion law of particulates of various sizes in a zoned gas-flow field. **Key words:** swirl-type burner, coal combustion, air staged combustion, low NO_x emissions

基于小波变换的气化燃烧状态诊断试验研究 = **Experimental Investigation of the Diagnosis of Gasified Combustion Status of a Wavelet-based Transformation** [刊, 汉] / LIANG Qin-feng, YU Guang-suo, NIU Miao-ren, et al (Research Institute of Clean Coal Technology under the East China University of Science & Technology, Shanghai, Post Code: 200237) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(5). — 506 ~ 508, 516

An effective method is proposed for analyzing through pressure signals the flame gasified combustion condition of an entrained flow gasifier. Under this method a scalar decomposition approach has been utilized to analyze furnace pressure time-domain signals. A study has revealed that in a cold state prior to ignition there exists no characteristics frequency. Under the condition of ignition and flame-extinction the pressure signals experience a step change with the signals at 0 Hz being subjected to a relatively great shock. In time of flame intensive fluctuations there exists a characteristic frequency of about 2 Hz. With the flame in a stable combustion state there will be a characteristic frequency of about 40 Hz. The above phenomenon indicates that within a certain range of frequencies the pressure signal distribution is closely related to the flame combustion condition in the gasified furnace. With the strengthening of flame combustion stability the pressure signals will shift in the direction of higher frequencies. **Key words:** wavelet transformation, entrained flow gasifier, flame, combustion diagnosis

中温下热解对半焦燃烧反应性的影响 = **The Impact of Medium-level Temperature Pyrolysis on Semicoke Combustion Reactivity** [刊, 汉] / LIU Yan-xia, LU Jun-fu, LI Yong, et al (Department of Thermal Energy Engineering under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(5). — 509 ~ 512

By employing the method of thermogravimetric analysis and powder X-ray diffraction measured respectively were the combustion reactivity and structural changes of the semicoke of two low-rank bituminous coals and one type of anthracite during the process of pyrolysis at 400 ~ 1400 °C. The cause of the variation in reactivity of the low-rank coals was also dis-