

# 高温预混燃烧对湍流积分尺度影响的 PIV 研究

龚志军, 陈伟鹏, 武文斐

(内蒙古科技大学 内蒙古自治区白云鄂博矿多金属资源综合利用重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 应用 PIV(粒子成像测速技术) 针对工业燃烧设备中以平焰燃烧为代表的高温预混燃烧过程, 开展燃烧与非燃烧的冷、热态两种工况湍流流场的对比研究, 揭示了高温预混燃烧对湍流涡旋积分尺度分布特性的影响。研究发现: 伴随着动量和能量传输的燃烧过程, 高温预混燃烧直接影响湍流涡旋结构的大小及分布。热态燃烧工况存在的最小积分尺度(12 mm) 恰好是位于动量、能量强烈交换的火焰区, 而速度和速度梯度很小的低速流动区存在较大积分尺度(23 mm)。本研究为深入分析预混火焰传输机理打下基础。

**关键词:** 平焰燃烧; 湍流流动; 粒子图像测速(PIV); 积分尺度(ILS)

中图分类号: TK411<sup>+</sup>.12      文献标识码: A  
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.04.021

## 引言

工业燃烧设备中的流动大多数为湍流, 湍流燃烧是当今工程研究领域中最复杂的研究课题之一<sup>[1]</sup>。湍流燃烧是包含流动、传热和传质的非常复杂的非线性耦合传输过程, 其中湍流流动对燃烧特性影响的研究正逐步深入, 而对这一问题的认知却是学术界的热点和难点。

湍流积分尺度是标志湍流旋涡大小的特征值, 通常被用以真实描述湍流涡旋中总体涡的平均尺度及其涡能量水平, 尺度越大其能量水平就越高。由于温度、流动等外部传输因素与涡的产生、迁移、旋转及破碎等传输过程密切相关, 高温燃烧通过所包含的传输过程直接影响湍流的特性, 进行燃烧过程中湍流涡大小和能量的积分尺度特征值分析成为一种研究方法。近几十年来, 随着 PIV(粒子成像测速技术) 的飞速发展, 使得对湍流燃烧中湍流特性积分尺度的精确测量成为可能, 因此利用 PIV 技术开展高温燃烧对流场湍流积分尺度特性的准确认识

具有一定的意义。

国内外学者搭建冷态实验模型<sup>[1-5]</sup>, 发挥 PIV 技术在湍流特性研究中显示出来的巨大作用, 模拟燃烧开展湍流积分尺度特性的研究。JUN JI 和 Rong F. Huang 使用 PIV 技术分别对高、低雷诺数下旋流燃气燃烧器的湍流涡结构进行研究<sup>[6-7]</sup>, 发现了涡结构对火焰特性有较大的影响, 对强化燃烧有明显促进作用。刘刚等人使用 PIV 技术研究了汽油机缸内的湍流涡尺度<sup>[3]</sup>, 认为湍流积分尺度分布对合理组织发动机缸内油气的混合过程, 提高动力性与经济性, 减少污染物排放有较大现实意义。龚志军等人应用 PIV 技术对平焰燃烧的热态流场与相应冷态流场进行了对比测量分析<sup>[5]</sup>, 但没有进一步分析高温燃烧对湍流涡变化特性的影响。由于受到高温燃烧实验条件的限制, 目前研究主要集中在冷态湍流涡积分尺度方面, 应用 PIV 技术开展热态燃烧对湍流涡尺度影响的研究还不多见。

工业炉窑上普遍使用的平焰燃烧是利用高强度旋转气流在扩张型喇叭口上的附壁效应形成强湍流平展火焰<sup>[8-9]</sup>, 具有火焰温度高、温度均匀及稳定性好的特点, 适用于开展高温燃烧对湍流涡尺度的研究<sup>[10-12]</sup>。本研究以平焰火焰为主要研究对象, 搭建平焰预混高温燃烧试验台, 针对高温燃烧热态和冷态两种因素的实验工况, 应用 PIV 技术测量燃烧域湍流瞬时速度场, 开展基于湍流积分尺度下的高温燃烧对湍流涡尺度特性影响的研究。

## 1 实验模型建立及湍流积分尺度计算

### 1.1 实验模型建立

实验模型原理如图 1 所示。模型由炉体、平焰

收稿日期: 2014-06-04; 修订日期: 2014-08-23

基金项目: 内蒙古科技厅应用技术研发资金计划项目(20130310); 内蒙古自然科学基金项目(2014MS0550); 内蒙古创新团队资助项目(NMGIRT1406)

作者简介: 龚志军(1977-), 男, 内蒙古包头人, 内蒙古科技大学副教授, 在读博士。

烧嘴、送引风机及 PIV 等主要仪器设备组成,燃烧炉采用自行设计的蓄热式液化石油气平焰烧嘴高温燃烧试验炉,炉膛有效尺寸为 1 800 mm × 1 000 mm × 800 mm,顶部布置单个平焰烧嘴,旋流数为 1.76。炉膛下部侧面对称布置 2 个烟气出口。侧墙和后墙设有 2 个方孔,用以布置 PIV 仪器的 CCD(电荷耦合器件)镜头和激光片光源,片光源位置位于烧嘴中心轴断面位置。其中测量燃烧区域的气体流动特性所采用的 PIV 测量系统是美国 TSI 公司的产品,主要由激光器、同步器、CCD 镜头及图像处理系统组成。其中激光器系统是由 2 台 YAG120—15E 激光器及光路调整系统封装成一体的,输出激光波长为 532 nm。单次激光脉冲能量为 120 mJ,激光脉冲能量以及两脉冲时间间隔均可以连续地调节,CCD 相机的分辨率是 1660 × 1220 像素。为避免热态试验过程中周围火焰红色光对 PIV 成像的干扰,在镜头前布置滤光镜,仅让示踪粒子反射光通过,使周围环境光被滤掉。

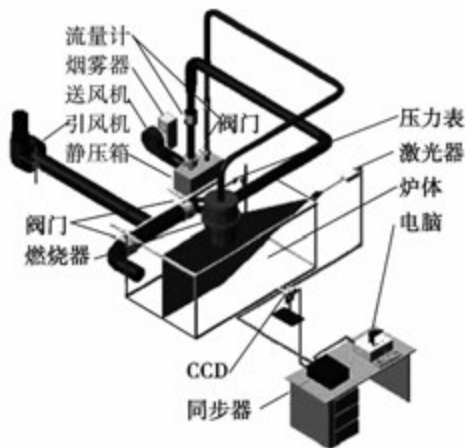


图 1 实验模型原理图  
Fig. 1 Schematic of the experimental model

其中燃烧器结构尺寸及 PIV 测量区域如图 2 所示,测量区域为 400 mm × 300 mm 的轴侧面,包括燃烧器扩张口附近的湍流火焰区、火焰侧的附壁射流区及沿火焰中心处的负压回流区。采用平均粒径约为 50 μm 的 CaO 粒子为示踪粒子,这种粒子的粒径小,在燃烧环境下的化学性质稳定,用于描述跟随性的 Stokes 数等于 0.75,有较好的流动跟随性和光学散射性。PIV 系统选择 15 帧/s 的采集速度,通过系统 Insight 软件处理,得到所测区域的平均速度场、

瞬时速度场及涡量场等流场信息。经计算分析,数据采样达到 35 次后时均结果的变化与采样数基本无关,故实验选择每组实验采集 50 组数据。实验中液化石油气流量为 8 m<sup>3</sup>/h,鼓风机的送风量为 263.73 m<sup>3</sup>/h,过剩空气系数为 1.06。冷态实验时,模拟液化石油气的空气流量为 12.37 m<sup>3</sup>/h,助燃空气流量为 263.73 m<sup>3</sup>/h。

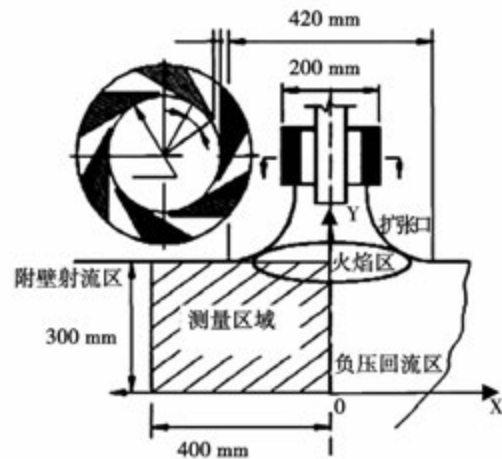


图 2 测量区域示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of the test section

1.2 湍流积分尺度计算

利用 PIV 技术计算出的瞬时速度分量,根据这些速度分量值通过 MATLAB(矩阵实验室)编程处理,可以得到流场中每一点的空间自相关系数,再对自相关系数积分得到流场中每一点的湍流积分尺度,随之生成湍流积分尺度分布图。

湍流积分尺度为流场中相邻两点脉动速度的相关系数相对两点间可变距离的积分值。将积分尺度分解为 4 个一维分量  $L_{xx}$ 、 $L_{xy}$ 、 $L_{yx}$ 、 $L_{yy}$ ,其中第 1 个下角标代表被积分的速度分量的方向,第 2 个角标则代表沿  $x$  或  $y$  方向积分。现以  $L_{xx}$  的计算过程为例进行说明。

$$R_x = \sum_{i=1}^{50} u'(x, i) \cdot u'(x + \Delta x, i) / \sum_{i=1}^{50} u'^2(x, i) \tag{1}$$

$$L_{xx} = \int_0^{\Delta x_{max}} R_x dx \tag{2}$$

式中:  $u'(x, i)$ 、 $u'(x + \Delta x, i)$  —  $X$  轴上相距为  $\Delta x$  的两点在 50 次采样中的第  $i$  次来拦时  $X$  方向的脉动分量;  $R_x$  —  $X$  方向的自相关系数; 积分上限  $\Delta x_{max}$

— X 轴上首次使相关系数  $R_x$  为零的几何尺寸。再将  $L_{xx}$  等 4 个一维分量进行正交合成,就得到了测量区域轴侧面积分尺度  $L_{ILS}^{[13]}$ :

$$L_{ILS} = \sqrt{L_{xx}^2 + L_{xy}^2 + L_{yx}^2 + L_{yy}^2} \quad (3)$$

## 2 实验结果及分析

图 3 和图 4 分别为冷、热态流场流线图。通过两图中流线分布可以看出,单个烧嘴的强旋流射流从扩张口流出时形成平展流,在旋流作用下,形成附壁射流区和中心负压回流区。由于高温燃烧时各个燃料微团在与助燃剂结合后燃烧,燃烧前后气体量的增加和气体吸收燃烧放热后迅速升温造成的体积膨胀,导致冷态与热态两个流态区形状明显不同。与冷态流场相比,燃烧状况下回流区的宽度增加,冷态流场的回流区在炉顶的半宽度为 100 mm 左右,而热态流场的回流区在炉顶的半宽度为 200 mm 左右。与冷态流场相比,燃烧状况下附壁射流区的厚度变薄。冷态流场的附壁射流区厚度为 150 mm 左右,而热态流场的附壁射流区厚度不到 100 mm。

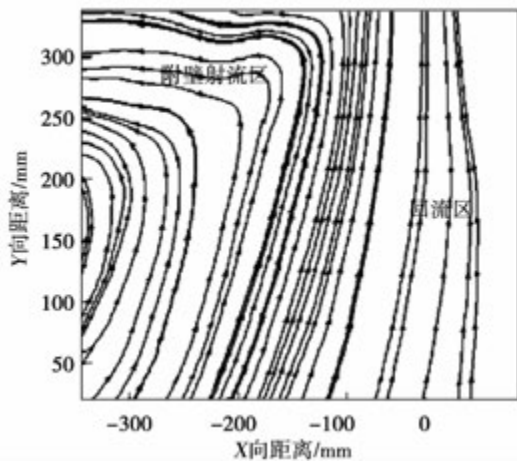


图 3 冷态流场流线分布图

Fig. 3 Steamline chart of the cold flow field

由于在附壁射流区内会形成平焰燃烧,因此为了重点研究该区域的速度分布特性,在距离顶部 50 mm 处 ( $Y = 300$  mm) 作一截面,作出该截面处的径向速度分布规律与轴向速度分布规律,如图 5 - 图 6 所示。

从图 5 中可以看出,径向速度的变化可以分为

3 段。第 1 段为回流区,气体的流动为沿轴向上的回流,轴向速度很大,径向速度较小。冷态时径向速度几乎为零,热态时径向速度稍大。第 2 段,在扩张口内径向速度在旋流产生的离心力作用下迅速增大,在扩张口出口处二者的径向速度接近 2 m/s。因为以向右为速度正方向,所以图中的径向速度为负值。在第 3 段,冷热态径向速度的变化规律明显不同。该段区域为附壁射流区,气体的流动为沿着顶部的贴附射流,主要为径向速度。对于冷态来说,由于扩张口边缘的阻力作用和流体动能的衰减,径向速度逐渐减小到 1 m/s。而对于热态来说,径向速度则仍然继续增大,达到 4 m/s。这是由于燃烧时产生大量的热,火焰周围气体的温度将迅速上升,导致气体体积膨胀,体积膨胀产生的推力克服了扩张口边缘的阻力损失,使燃烧气体加速运动,使径向速度继续增大。从图 6 中可以看出,在轴心回流区内,轴向速度呈钟形分布,沿轴线基本对称。热态的回流速度比冷态要大,在轴心的回流速度最大,冷态的最大回流速度为 1.5 m/s,热态的最大回流速度达到 3.3 m/s,是冷态时的 2 倍多。这是由于燃烧使气体温度升高,气体体积膨胀产生的推力作用使回流速度增大。

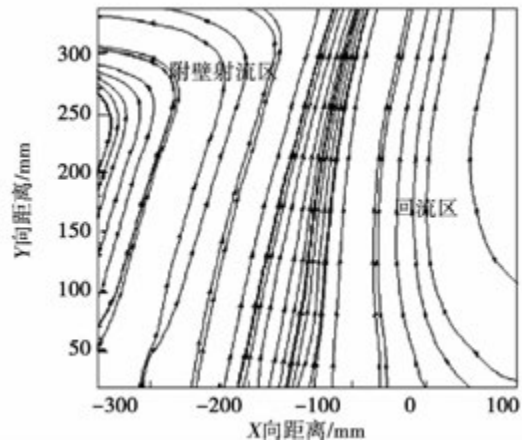


图 4 热态流场流线分布图

Fig. 4 Steamline chart of the hot flow field

图 7 和图 8 分别为冷态和热态下测量面的湍流积分尺度分布图。从整个测量区域看,冷态工况积分尺度整体小于热态工况,冷态积分尺度范围为 12 - 19 mm,热态积分尺度为 12 - 23 mm。由于预混燃烧火焰为盘状,火焰区占炉膛体积相对较小,涡旋

尺度变化仅在炉膛空间局部发生,测量区湍流积分尺度并没有明显增大。

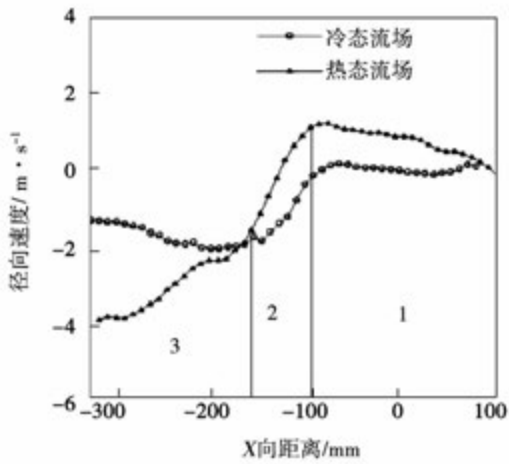


图5 径向速度  $u$  沿水平方向变化曲线  
Fig.5 Variety graph of radial velocity

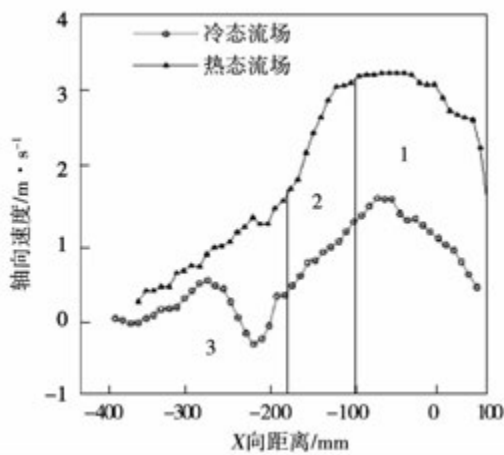


图6 轴向速度  $v$  沿水平方向变化曲线  
Fig.6 Variety graph of axial velocity

由图7可知,最大积分尺度分别出现图中左下角的位置,呈斜向带状分布和近似圆环状,其值约为19 mm,冷态实验使用常温空气模拟液化石油气,左下角处速度小于0.5 m/s,处于层流状态。尽管回流区速度较大,但轴向和径向速度梯度几乎不变,大涡并没有破碎,导致湍流积分尺度在这个区域较大。冷态最小积分尺度出现在附壁射流区与回流区交界面上和回流区下边界面上,其值均为12 mm,这两个区域的速度梯度变化很大,尤其在射流区与回流区交界面上,向上回流与贴壁射流在该位置发生涡旋碰撞破碎,湍流积分尺度最小。

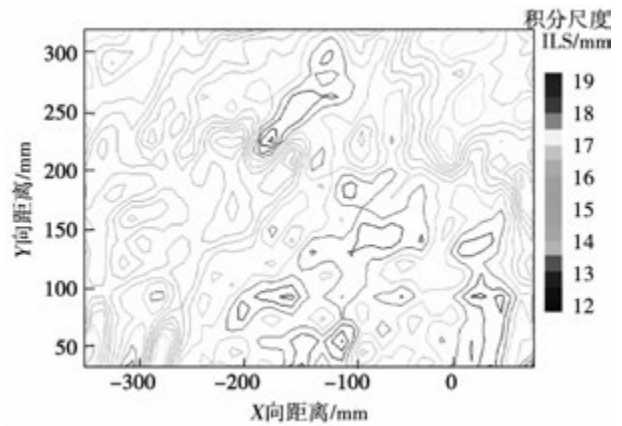


图7 冷态湍流积分尺度分布图  
Fig.7 ILS of the cold flow field

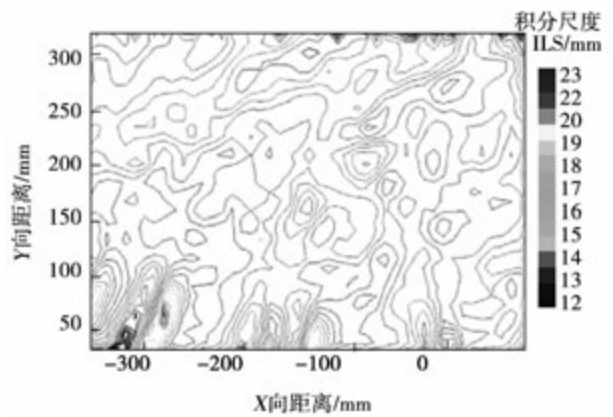


图8 热态湍流积分尺度分布图  
Fig.8 ILS of the hot flow field

由图8可知,热态工况的最大积分尺度仅出现在图中左下角与冷态相同的位置,其值为23 mm,由于速度小,产生的原因与冷态相同,涡旋的尺度和能量最大。热态积分尺度的最小值却出现在回流区入口边界,即在高温烟气与空气和燃气相互混合、传热的强烈动量交换和热量交换的火焰区域。在该区域,由于火焰温度为1 800 ℃,气体膨胀造成压力增加,加速气体的流动与混合,同时烟气粘性由于高温而增大,这两种情形导致湍流粘性耗散有较大程度增加,漩涡破碎直接改变湍流积分尺度的变化。同时在附壁区起始段也存在积分尺度呈带状的较小区,但由于射流区和回流区的混合交界面长,带状长度与交界面长度大小相当。

### 3 结 论

应用 PIV 技术,通过对平焰预混燃烧的冷态与热态工况进行基于积分尺度的湍流涡旋的对比分析,得到了高温燃烧对湍流积分尺度分布特性的影响:

(1) 与冷态流场对比,燃烧状况下流场的回流区宽度增加,回流速度增大,其中最大回流速度增大 2 倍多。附壁射流区厚度变薄,附壁射流区内的径向速度持续增加。

(2) 燃烧过程伴随的动量和能量传输过程直接影响湍流涡旋结构的大小及分布,高温预混燃烧的热态工况的平均湍流积分尺度比冷态的平均尺度大、能量高,冷态范围为 12 - 19 mm,整体小于热态工况的 12 - 23 mm,冷态平均积分尺度为热态的 0.88 倍。

(3) 冷热态工况出现最小积分尺度的位置完全不同。热态工况存在的最小积分尺度恰好是动量、能量强烈交换的火焰区,气体高温燃烧过程的旋涡破碎对湍流尺度大小及分布特性有较大影响。而冷态工况存在最小积分尺度仅在动量交换较大的部分交界面上,与热态工况的最小湍流积分尺度对应位置相比,由于速度梯度小积分尺度反而很大,进一步说明高温燃烧对湍流涡旋结构有很大影响。对于冷热态两工况,最大积分尺度均出现在速度和速度梯度很小位置,说明无动量交换的低速流动区,涡旋破碎几率很小,涡旋尺度往往最大。

#### 参考文献:

- [1] Khoo B C, Chew T C, Heng P S. Turbulence characterization of a confined jet using PIV [J]. *Experiments in Fluids*, 1992, 13: 350 - 356.
- [2] Chen Y C, Kalt P A M, Masri A R. Feasibility study of integral length scale measurements in turbulent jet flows using DPIV [C]. 2nd Australian conference on laser diagnostics in fluid mechanics and combustion, Monash University, Melbourne, Australia, 1999: 9 - 10.
- [3] 刘 刚,汪 洋. 用 PIV 技术研究汽油机缸内流场的湍流积分

尺度 [J]. *实验流体力学*, 2007, 21(1): 59 - 63.

- LIU Gang, WANG Yang. PIV measurements of the ILS on in-cylinder gas turbulent flow field of gasoline engine [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2007, 21(1): 59 - 63.
- [4] 张庭芳,吴志军. 利用 PIV 技术研究湍流积分尺度 [J]. *南昌大学学报(工科版)*, 2005, 27(3): 1 - 3.  
ZHANG Ting-fang, WU Zhi-jun, Research into turbulence integral length scale by PIV [J]. *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology)*, 2005, 27(3): 1 - 3.
  - [5] 龚志军,武文斐. 平焰燃烧湍流场的冷热态比较 [J]. *钢铁研究学报*, 2008, 6(3): 31 - 35.  
GONG Zhi-jun, WU Wen-fei. Comparison between turbulent flow field of flat flame combustion and cold air-flow field [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2008, 6(3): 31 - 35.
  - [6] Jun Ji and Jay P. Gore. Flow structure in lean premixed swirling combustion [J]. *Proceedings of the Combustion Institut*, 2002, 29(5): 861 - 867.
  - [7] Rong F. Huang, Shun C. Yen. Aerodynamic characteristics and thermal structure of non-premixed reacting swirling wakes at low Reynolds numbers [J]. *Combustion and Flame*, 2008, 155(2): 539 - 556.
  - [8] Boshu He, Jinyuan Xu. Measured vorticity distributions in a model of tangentially fired furnace [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2005, 15(5): 537 - 554.
  - [9] Yongfa Diao. Vorticity measurements in complex 3-D flow in tangentially-fired Furnaces [J]. *Flow Measurement and Instrumentation* Boshu, 2002, 15(2): 173 - 181.
  - [10] 刁永发,何伯述,许晋源,等. 四角燃烧器射流向火侧相干结构涡的研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(3): 150 - 155.  
DIAO Yong-fa, HE Bo-shu, XU Jin-yuan, et al. Coherent structure vortices on the fire-facing side of four burner jets [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(3): 150 - 155.
  - [11] Norbert Peters. *Turbulent combustion* [M]. UK: The press syndicate of the university of cambridge, 2000.
  - [12] Hinze J O, Huang Yongnian, Yan Dachun. *Turbulence* [M]. Beijing: Science Press, 1987.
  - [13] 张庭芳,田 华,吴志军,等. 利用光学测速技术 PIV 及 LDV 研究流场积分尺度的方法 [J]. *江西科学*, 2005, 23(1): 54 - 56.  
ZHANG Ting-fang, TIAN Hua, WU Zhi-jun. Methods of researching turbulence integral length scale by PIV and LDV [J]. *JIAN-GXI SCIENCE*, 2005, 23(1): 54 - 56.

(姜雪梅 编辑)

This paper, based on self-designed fluidized bed experimental platform, aiming to collect the pressure fluctuation signals at entrance of the hood, analyzes the multi-fractal spectrums of pressure fluctuation signals. It can be obtained that when the air mass flow is constant, with the increase of static bed height, the state of fluidized bed is more and more stable. Combine multi-fractal spectrum with the ensemble empirical mode decomposition (EEMD), the pressure fluctuation signals under different conditions are analyzed. The results reveal that: after the reconstruction of phase space, the intrinsic mode functions of multi-fractal spectrum can well characterize the features of pressure fluctuation in fluidized bed, which is important for a deeper understanding of the flow characteristics in fluidized bed. **Key words:** gas-solid two-phase flow, the phase space reconstruction, ensemble empirical mode decomposition, multi-fractal spectrum

U-Beam 惯性分离器的三维数值模拟 = **3D Numerical Simulation of U-Beam Inertia Separator** [刊, 汉] CHEN Yang, LIU Bai-qian, TAN Pei-hai ( School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, China, Post Code: 100083) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(4) . - 570 - 574

3D Flow field and gas-solid separation performance of U-Beam inertia separator has been simulated with commercial software in order to decrease power consumption of CFB boiler induced-draft fan. Reynolds-Stress model is selected after comparing the results of 3D simulation, which shows as followings. There is a upwind effect at upper part of U-Beam; There is a bottom effect enhancing particle separation; There is a certain operation air speed in U-Beam gas-solid separator that gives the lowest pressure coefficient; Most of dust particle has been separated from the first 2 row U-Beam. These results reveal that the reason why U-Beam inertia separator has the lower separating efficiency is due to a stronger turbulent fluctuation within U-Beam. **Key words:** U-Beam inertia separator, separating efficiency, pressure coefficient, simulation

高温预混燃烧对湍流积分尺度影响的 PIV 研究 = **PIV Study on Effect of High Temperature Premixed Combustion on Turbulence Integral Scale** [刊, 汉] GONG Zhi-jun, CHEN Wei-peng, WU Wen-fei ( Key Laboratory of Integrated Exploitation of Bayan Obo Multi-Metal Resources, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, Post Code: 014010) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(4) . - 575 - 581

In this paper, experiments have been performed to research the high temperature premixed combustion process of flat-flame combustion by PIV technique. Through the comparison of the turbulent flow field under two different conditions about cold non-burning and hot combustion, it reveals the effect of high temperature premixed combustion on distribution of turbulent vortex integral scale. The research shows that along with the momentum and energy transfer, the combustion process directly affect the size and distribution of the turbulent vortex structure, the minimum turbulence integral scale (12 mm) of hot-state combustion condition is exactly flame zone which the momentum and energy exchange strongly. However, the flow area which speed and velocity gradient is very small exists large turbulence integral scale (23 mm). The author thinks that this study would establish the foundation for the depth of the premixed flame transmission mechanism. **Key words:** Flat-Flame Combustion, Turbulence Flow, Particle Image Velocimetry (PIV), Integral Length Scale (ILS)

高温紊流烟道内减温喷淋层布置方式研究 = **Research on the Arrangement of Thermoreduction of Spray Layer in Elevated Temperature Turbulent Flue** [刊,汉] HAO Ji-guang( School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, China, Post Code: 100081), ZHANG Qian( Shenhua Guohua ( Beijing) Electric Power Research Institute Co. Ltd, Beijing, China, Post Code: 100025) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(4). -582 -586

The numerical simulation is about the arrangement of spray layer arrangement in front of the entrance of absorption tower using the method CFD and Discrete Phase Model (DPM). The conclusions are as follows: the droplets is difficult to penetrate the flue gas when the direction of spray layer is perpendicular to the gas flow influenced by velocity of flue gas. It is helpful to reduce the temperature of the flue gas and to avoid the blockage of nozzle if the direction of spray layer is parallel to the gas flow and downstream. The mass flow of cooling water increases more than 60% when the droplets diameter increase 50  $\mu\text{m}$ . The nozzle arrangement in spray layer is related to the velocity of the flue gas. More nozzles should be installed at the place where the flue gas is rapider. **Key words:** accident flue gas, spray layer arrangement, discrete phase models, numerical simulation

切圆喷淋湿法脱硫塔内部流场的模拟 = **Simulation of Internal Flow Field in Tangential Spray Desulfurization Tower** [刊,汉] YANG Jia-jun ( Guangzhou power plant Co. Ltd, Guangzhou, China, Post Code: 510160), KAN Yin-hui, ZHANG Jing-zheng, LIU Ding-ping( School of Electricity, South China University of Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(4).