

双旋流燃油燃烧火焰结构可视化试验研究

袁用文, 葛冰, 田寅申, 臧述升

(上海交通大学机械与动力工程学院 叶轮机械研究所, 上海 200240)

摘要: 采用 PLIF(平面激光诱导荧光技术) 对不同燃气、空气当量比下双旋流燃油火焰的结构进行了可视化试验研究。随着燃气、空气当量比的增大, 双旋流燃油燃烧的主要反应区向燃烧器下游移动, 火焰面积增大, 火焰锋面内、外测张角均单调减小, 并且在距旋流器出口 $Z/D = 0.183$ (Z 为轴向距离, D 为外旋流器的直径) 处火焰的厚度逐渐增大; 燃气、空气当量比为 0.27 时, 双旋流燃油火焰出现局部熄火再燃现象; 燃气、空气当量比大于 0.62 时, 从燃烧器尾部观察发现火焰充满整个燃烧器截面, 火焰周向封闭。

关键词: 双旋流燃烧器; 燃油火焰可视化; OH-PLIF

中图分类号: TK223.23 文献标识码: A
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.05.016

引言

对双旋流燃油燃烧的研究最初主要集中于双旋流对场和燃油雾化的影响^[1-2]。随着激光测量技术的发展, 更多先进的激光技术引入到旋流作用对燃烧反应影响的研究中。PLIF 技术的使用能提高对流体速度和热释放率相互作用关系的研究, 同时也能用于分析化学反应和流场的关联, 因此该技术已广泛用于气体燃料燃烧诊断中。但在液体燃料(尤其是碳氢燃料)燃烧中, 由于弹性散射的激励激光和由激励激光引发的各种 PAH(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) 荧光和碳烟炽光会产生光学噪声, PLIF 技术的应用受到了限制。

文献[3-5]对比了 OH-PLIF 法和 OH 基化学荧光法, OH-PLIF 能获得更多详细流场信息和燃烧过程的特征。文献[6]采用 OH-PLIF 法研究了旋流数和头部入口空气温度变化对燃油火焰锋面位置的影响, 增大旋流数会使平均火焰锋面向燃烧器上游移动, 而增大燃烧器头部入口空气温度, 平均火焰锋面向下游移动。

本研究利用 PLIF 激光测量技术, 针对双旋流燃

油燃烧器在不同燃气、空气当量比下火焰结构特征进行了可视化试验研究。

1 试验装置和工况

图 1 为双旋流燃油燃烧试验系统示意图, 该系统主要包括燃油供给系统、主燃空气系统、可视化燃烧器和光学测量系统。

试验采用 PLIF 拍摄火焰中 OH 基从而来研究燃烧反应的主要区域和火焰锋面位置。OH-PLIF 系统主要由激光光源、荧光信号采集、同步系统及其它相关配件构成。该系统由泵浦激光器产生波长 532 nm 的脉冲激光, 经染料激光器和倍频晶体后波长变为 281.2 nm, 然后经过由凸透镜、圆柱透镜组成的透镜组后形成高 70 mm、厚约 0.8 mm 的片光, 片光与燃烧器中心轴线平面重合, 在与片光垂直方向上安装 ICCD 相机, 通过 DG535 同步器调整延时, 确保 OH 荧光信号产生的时刻与 ICCD 开始拍摄的时刻同步。

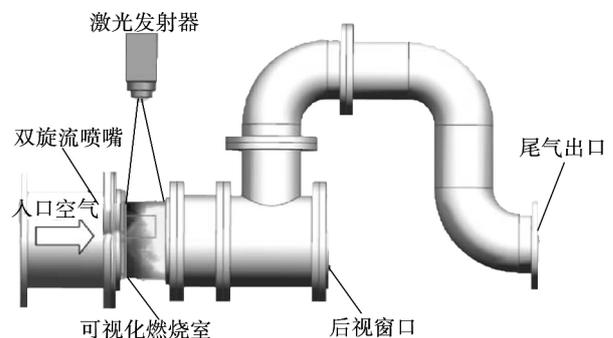


图 1 双旋流燃油燃烧试验系统示意图

Fig. 1 Sketch map of the dual-swirl fuel oil combustion experiment system

试验所用的旋流器结构如图 2 所示, 包括内旋

收稿日期: 2014-08-28; 修订日期: 2014-10-23

作者简介: 袁用文(1988-), 男, 湖北恩施人, 上海交通大学硕士研究生。

流器和外旋流器,均为直叶片式轴向旋流器。内旋流器和外旋流器的叶片的安装角 γ_1 、 γ_2 都为 45° ,但叶片的旋向相反。燃油喷嘴采用离心压力雾化喷嘴,喷雾张角为 60° 。试验中 OH 的拍摄范围如图 2 中矩形方框所示,该区域长为 100 mm,宽为 64 mm。

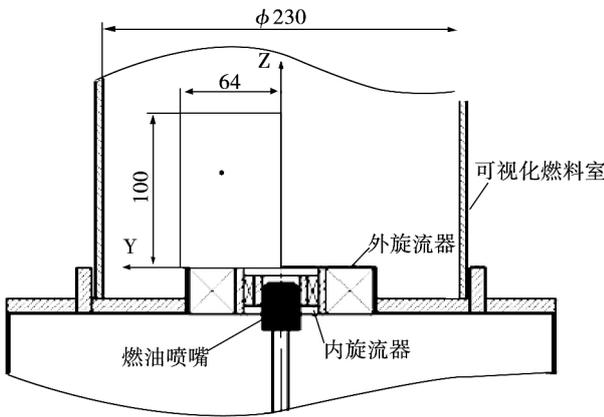


图 2 旋流器结构和 PLIF 拍摄位置示意图(mm)

Fig. 2 Sketch map of the swirler structures and PLIF shooting area(mm)

气流的旋流强度通常可以通过旋流数 S 来表征,旋流数越高旋流强度越强。旋流数的定义为:

$$S = \frac{G_{ang}}{R_b G_x} = \frac{\int_0^\infty \rho U W r^2 dr}{R_b \int_0^\infty \rho (U^2 - \frac{1}{2} W^2) r dr} \quad (1)$$

式中: G_{ang} —旋流气流切向动量的轴向通量; G_x —轴向推力; R_b —燃烧器的半径; U 、 W —轴向和切向速度分量^[7-8]。

在轴向流动分布均匀的假设下, U 和 W 与叶片安装角 γ (γ_1 、 γ_2 的统称) 直接相关,即 $\tan\gamma = U/W$ 。因而,单极轴向旋流器的旋流数的表达式^[9-10]为:

$$S = \frac{2}{3} \tan\gamma \left(\frac{1 - R_c^3}{1 - R_c^2} \right) \quad (2)$$

式中: γ —旋流叶片安装角 ($^\circ$)。

R_c 为旋流器内外径之比:

$$R_c = \frac{R_1}{R_2} \quad (3)$$

式中: R_1 、 R_2 —旋流器环形通道的内径和外径, mm。

由式(2) 计算出内旋流器的旋流数 S_1 为 0.88; 外旋流器的旋流数 S_2 为 0.77。

试验在常温常压下进行,采用轻质柴油作为燃料。试验中保持燃油的质量流量为 0.002 81 kg/s,

内、外旋流器统一供气,通过改变进入旋流器的总空气流量来调节当量比。当量比分别取为 0.77、0.62、0.47、0.38、0.27 的 5 个工况,具体工况如表 1 所示。

表 1 试验工况

Tab. 1 Operating conditions

工况	旋流器入口速度 / $m \cdot s^{-1}$	当量比
1	5.1	0.77
2	6.3	0.62
3	8.2	0.47
4	10.5	0.38
5	14.8	0.27

2 试验结果与分析

图 3 为中心横截面上不同当量比下双旋流燃油火焰形状。从图中可以看出,随着当量比的逐渐增加,燃烧更加剧烈,火焰长度不断增加,燃烧器根部火焰张角变大。图 4 为从燃气器尾部拍摄的径向截面上不同当量比下双旋流燃油火焰形状。当量比较低时,火焰周向没有封闭,而是以喷嘴为中心,呈现花瓣型,火焰面出现不断破碎和生成现象。随当量比增大,花瓣形火焰逐渐稳定,并逐渐封闭。当量比为 0.62 时,火焰中心完全封闭。随着当量比继续增加,火焰分布的范围不断增大。

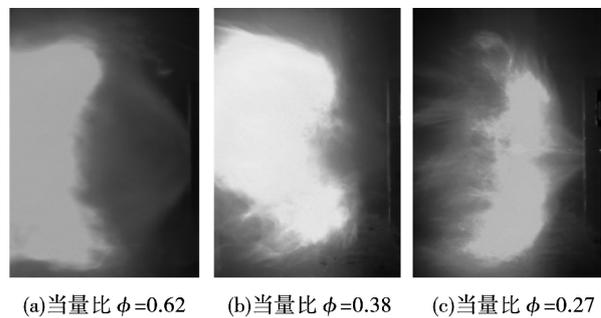


图 3 不同当量比下火焰中心横截面形状

Fig. 3 The lateral section shape of the middle of the flame in different equivalent ratios

文献[9-11]中指出双旋流燃油火焰在燃烧器头部主要稳定在内外旋流相互作用的剪切层中。因此在研究双旋流火焰结构时,对 OH-PLIF 时均图片进行了处理,如图 5 所示,并定义了表征火焰结构

的特征参数:

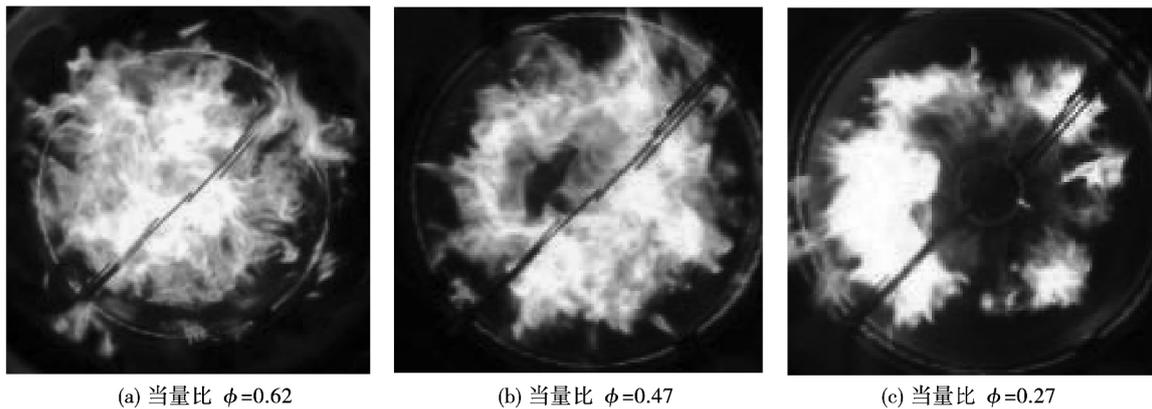


图 4 不同当量比下火焰径向截面形状

Fig.4 The radial section shape of the flame in different equivalent ratios

(1) 火焰主要反应区尺寸: OH - PLIF 荧光信号显示的是燃烧反应中处于化学平衡态下的 OH 自由基, 它的分布情况主要反映了燃烧反应的主要反应区的位置, 该区域的面积可以用来量化火焰主要反应区的尺寸 (D 为外旋流器的外径)。标准化火焰的面积 SSA 为 OH - PLIF 荧光信号强度大于一定阈值区域的面积占拍摄区域总面积的比例。

通过 OH 基荧光信号的瞬态图像可以看出火焰结构的变化。在当量比较高时, 火焰锋面相对比较稳定, 如图 6 (a) 中所示, 火焰锋面出现了褶皱; 当量比减小后, 火焰锋面向燃烧上游靠近喷嘴出口截面方向移动。继续减小当量比, 火焰锋面出现分离如图 6 (b) 所示, 这与图 3 (c) 中心横截面上的火焰形状相对应, 这是由于当量比减小后, 燃油的相对量减少, 发生局部熄火再燃过程。

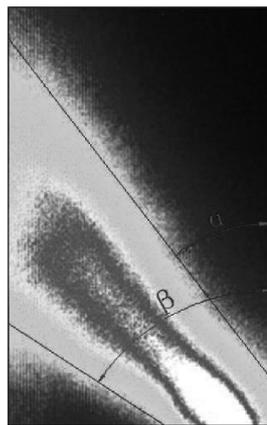


图 5 OH - PLIF 荧光信号中相关物理量定义

Fig.5 Definition of characteristics of flame in the OH - PLIF images

(2) 火焰径向厚度 TH: 在距离喷嘴出口固定位置处火焰在径向方向分布的长度, 单位为 mm。

(3) 火焰张角: 火焰内侧张角 α 定义为喷嘴出口火焰内侧锋面切线方向与燃烧器中心轴线之间的夹角, 用来量化火焰离开喷嘴时的扩张程度, 类似地可以定义火焰外侧张角 β 。

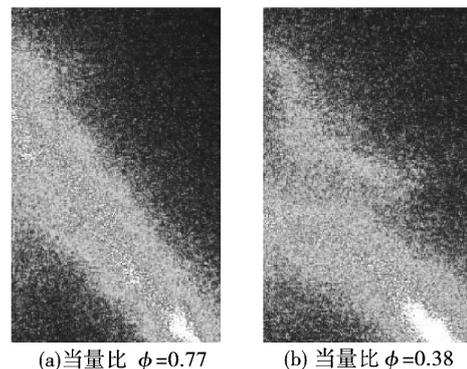


图 6 不同当量比下的火焰 OH 瞬态图像

Fig.6 Instantaneous images of OH concentration in different equivalent ratios

瞬态 OH - PLIF 图像进行平均处理得到相应工况下的时均 OH - PLIF 图像如图 7 所示, 这时可以看出火焰锋面的活动区域。从图 7 看出, 主要燃烧反应区域的形状成倾斜的喇叭状, 当量比减少时, 燃烧反应区的面积变小, 火焰张角也逐渐减小。

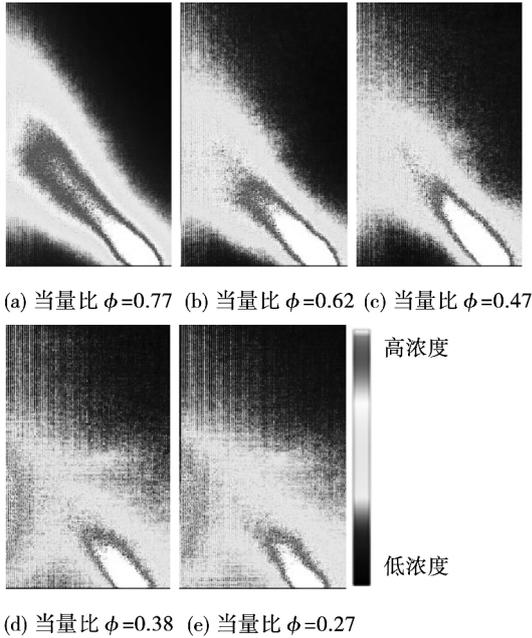


图 7 不同当量比下 OH - PLIF 的时均图像
 Fig. 7 The time averaged images of OH - PLIF distribution in different equivalent ratios

对时均 OH - PLIF 图像进行处理 得到火焰结构特征参数分布如图 8 - 图 10 所示。

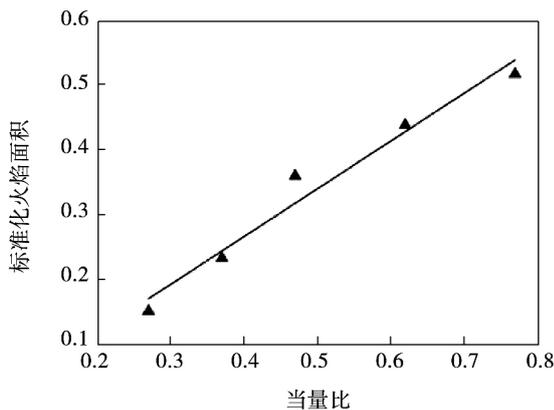


图 8 当量比对标准化火焰面积的影响
 Fig. 8 The influence of the equivalent ratios on normalized area of flame

图 8 给出了喷嘴出口双旋流燃油火焰面积随当量比变化的规律。当量比增大,双旋流燃油燃烧的主要反应区域的面积增大,轴向和径向尺寸均有所增大。这一现象反映出随着当量比的增大,燃料量相对增加,引起燃烧主要反应区迅速向周围扩散。

双旋流燃油火焰张角随当量比变化的规律如图 9 所示。随着当量比的增大,双旋流燃油火焰锋面的内、外侧张角均单调减小,但内侧张角减小的速度更快,说明头部旋流空气量相对减少,中央回流区在径向方向上的尺寸减小,燃烧反应区向燃烧器中心对称轴倾斜。另外在喷嘴出口截面与燃烧器壁面交界附近存在边角回流区,减缓火焰外侧锋面向燃烧器中心对称轴收敛的速度。

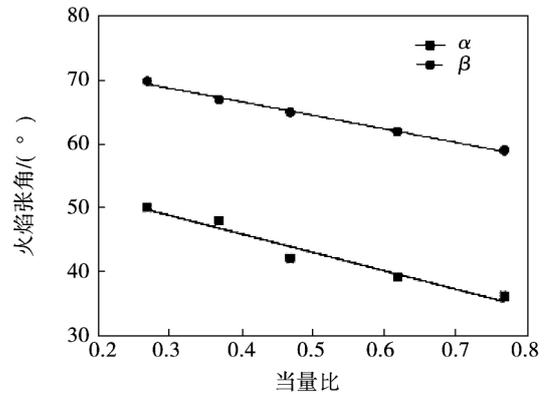


图 9 当量比对火焰张角的影响
 Fig. 9 The influence of the equivalent ratios on the angles of flame

在距旋流器出口 $Z/D = 0.183$ 处,燃油双旋流火焰厚度随当量比变化的规律如图 10 所示。当量比增大后,截面处火焰厚度逐渐增大。这主要是因为当量比增大,头部空气流量减小,内外旋流的相互作用减弱火焰在径向方向的约束作用。

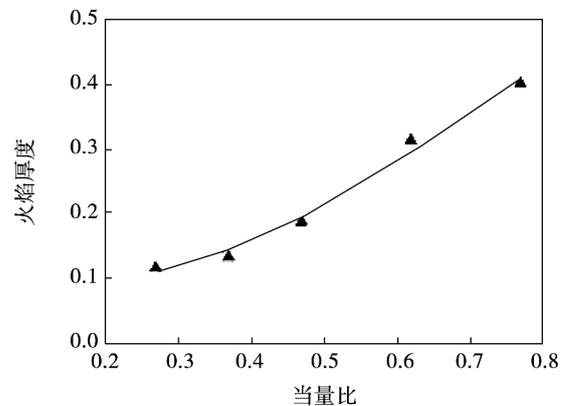


图 10 $Z/D = 0.183$ 处当量比对火焰厚度的影响
 Fig. 10 The influence of the equivalence ratio from $Z/D = 0.183$ on the thickness of flame

3 结 论

(1) 随着燃气、空气当量比的增大, 双旋流燃油燃烧的主要反应区与高温区向下游移动, 燃烧火焰逐渐封闭, 当量比大于 0.62 时, 中央火焰完全封闭。在当量比为 0.27 时, 双旋流燃油火焰发生火焰分离现象。

(2) 随着当量比的增大, 火焰锋面向燃烧器下游移动。火焰锋面的内、外张角均减小, 火焰的面积均增大。

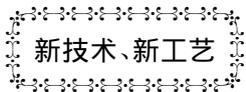
(3) 随着当量比的增大, 在距旋流器出口 $Z/D = 0.183$ 处, 火焰的厚度逐渐增大。

参考文献:

- [1] Metha J M. Mean Velocity and Turbulent Flow-field Characteristics inside an Advanced Combustor Swirl Cup [C]. AIAA 1989 - 0215, 1989.
- [2] Jeng S M, Flohre N M. Air Temperature Effects on Non-reacting Spray Characteristics Issued from a Counter-rotating Swirler [C]. AIAA 2005 - 355, 2005.
- [3] Culick F, Pun W, Palm S, et al. "Phase resolved PLIF and chemiluminescence for measuring combustion dynamics".
- [4] Hammack S, Kostka S, Lynch A, et al. Simultaneous 10 kHz PLIF

- and Chemiluminescence Imaging of OH Radicals in a Microwave Plasma-Enhanced Flame [J]. IEEE Transactions on Plasma Science 2013, 41(12): 3279 - 3286.
- [5] Kapadia B K, Kutne P, Gounder J D, et al. Combustion behavior of swirl stabilisedoxyfuelames at elevated pressure [C]. AIAA, San Diego, CA 2011.
- [6] Rodrigo Villalva Gomez, Brian J Dolan, David E Munday, et al. OH-PLIF Studies in a LDI Swirl-Stabilized Combustor. 52nd Aerospace Sciences Meeting 2014, 10. 2514/6. 2014 - 0656.
- [7] 宁 晃, 高 歌. 燃烧室气动力学 [M]. 第二版. 北京: 北京科学出版社, 1987.
- NING Huang, GAO Ge. Dynamics of Combustor, second edition. Beijing, 1987.
- [8] 郭培卿. 双旋流合成气非预混燃烧特性的实验研究与数值模拟 [D]. 上海: 上海交通大学博士论文, 2011.
- GUO Pei-qing. Experimental investigation and numerical simulation of non-premixed syngas flame with dual-swirler structure Shang Hai, Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [9] Lilly D G. Swirling Flow in Combustion: a Review [J]. AIAA Journal, 1977, 15(8): 1063 - 1078.
- [10] Karpetis A N, Gomez A. An Experimental Study of Well-Defined Turbulent Non-premixed Spray Flames [J]. Combustion and Flame, 2000, 121(1-2): 1 - 23.
- [11] Syred N, Beer J M. Combustion in Swirling Flows: A Review [J]. Combustion and Flame, 1974, 23(2): 143 - 201.

(丛 敏 编辑)



DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.05.017

配备在 MHI M501J 燃气轮机后面的首台余热锅炉

据《Gas Turbine World》2014 年 9 - 10 月刊报道, Nooter/Eriksen 已获得来自 GRDA(格兰德里弗大坝管理局) 的一个合同, 设计并供应俄克拉何马州舒蒂奥市 GRDA 项目所需的一台余热锅炉, 配备在 MHI(三菱重工) M501J 燃气轮机后面。

它将在北美洲第一台设计定制的在 MHI M501J 后面的余热锅炉。该三压再热余热锅炉采用管道补燃和控制排放的最新技术, 它将是额定输出功率为 495 MW 的 1 + 1 联合循环装置的组成部分。

该余热锅炉将回收来自 328 MW 功率燃气轮机的热量, 来生产蒸汽供给 167 MW 汽轮机上。

M501J 燃气轮机合同于今年 3 月签订。该 495 MW 联合循环装置将取代原有的燃煤机组。

(吉桂明 摘译)

shaft gas turbine , extended Kalman wave filtration , performance parameter , state estimation , diagnosis of thermal faults

3 种新型煤层气集输系统增压驱动方案 = **Three Supercharging and Driving Versions for Novel Type Coal Bed Centralized Transmission Systems** [刊 汉] ZHAO Hong-bin , JIANG Ting , YANG Qian (College of Mechanical Storage and Transportation Engineering , China University of Petroleum (Beijing) , Beijing , China , Post Code: 102249) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 , 30(5) . - 708 - 714

Under the coal bed gas production conditions in Qin-shui basin , three coal bed gas supercharging process system versions for recuperative type gas turbine cycle , solar energy aided gas-steam combined cycle , gas-Kalina combined cycle driving system were designed and the gas turbine waste heat utilization technologies were applied in the supercharging and driving of gas in gas transmission pipelines. Based on the total energy system theory and energy staged utilization principles , a model for the three supercharging systems was established by using the software Aspen Plus and an analysis was also performed of the thermal performance and energy saving potential of various systems. The analytic results show that the power generation efficiencies of the three versions are 60. 42% , 66. 51% and 65. 73% respectively , the costs saved each year are RMB 2. 3983 million yuan , RMB 2. 7254 million yuan and 2. 6858 million yuan respectively , the static investment payback periods are 4. 19 years , 4. 29 years and 4. 80 years respectively and the carbon dioxide emissions reduced are 3806. 06 t/a , 4462 t/a and 4382. 60 t/a , respectively thus enjoying a relatively good energy saving potential. **Key words:** driving by using gas turbines , waste heat utilization technology , Aspen Plus , static investment payback period

双旋流燃油燃烧火焰结构可视化试验研究 = **Experimental Study of the Visualization of the Flame Configuration During the Combustion of Fuel Oil in a Dual Swirling Flow** [刊 汉] YUAN Yong-wen , GE Bing , TIAN Yin-shen , ZANG Shu-sheng (Turbomachinery Research Institute , College of Mechanical and Power Engineering , Shanghai Jiaotong University , Shanghai , China , Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 , 30(5) . - 715 - 719

The plane laser induced fluorescence (PLIF) technology was used to conduct an experimental study of the visualization of the flame during the combustion of fuel oil in a dual swirling flow at various gas/air equivalent ratios.

With an increase of the gas/air equivalent ratio , the main reaction zone of the combustion of fuel oil in a dual swirling flow will shift to the downstream of the burner , the area of the flame will increase and the flare angles of the flame front at both inside and outside will monotonously decrease. In addition , at a place $Z/D = 0.183$ away from the outlet of the swirler (Z is the axial distance and D denotes the outer diameter of the swirler) , the thickness of the flame will gradually increase. When the gas and air equivalent ratio is 0.27 , there will emerge a local extinction and reburning phenomenon in the flame of fuel oil in a dual swirling flow. When the gas and air equivalent ratio is greater than 0.62 , it will be found that the flame is filled with the whole section of the burner in the tail portion of the burner and the flame will close along the circumferential direction. **Key words:** dual swirling burner , visualization of flame during combustion of fuel oil , OH-PLIF

1 000 MW 汽轮机低压末级二次水滴沉积特性分析 = **Analysis of the Secondary Water Droplet Deposition Characteristics in the LP Last Stage of a 1 000 MW Steam Turbine** [刊 汉] WANG Chun , XIE Dan-mei , YU Xing-gang (College of Power and Mechanical Engineering , Wuhan University , Wuhan , China , Post Code: 430072) , LI Xi-bin , FAN Xiao-ping , YIN Ming-yan (Dongfang Steam Turbine Co. Ltd. , Deyang , China , Post Code: 618000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 , 30(5) . - 720 - 724

Numerically calculated was the flow field inside the last two stages of a 1 000 MW thermal power generation purposed steam turbine by using the software ANSYS CFX and determined was the distribution of the primary water droplets at the inlet of the last stage along the radial direction. By making use of the secondary water droplet proportion , the primary water droplet proportion was predicted and its distribution along the radial direction was also reasonably corrected , thus obtaining the boundary conditions of the secondary water droplets at the inlet of the last stage with a relatively high precision. Finally , the distribution of the water droplets deposited on the surface of the stator blades of the last stage was calculated. It has been found that the proportion of the secondary water droplets at the inlet of the stator blade cascade of the last stage is 10% and mainly distributed at the relative blade height of above 60% and the secondary water droplet deposition rate on the stator blade surface of the last stage is 77.8% , among which that on the pressure surface accounts for 60.9% of the total deposition amount , along the radial direction , the secondary water droplets mainly deposit at the relative blade height of above 30% while along the axial direction , they mainly stand on the pressure surface after the blade width of 80% and on the suction surface before the blade width of 40% . **Key words:** steam turbine , stator blade in the last stage , secondary water droplet , deposition distribu-