

文章编号:1000-8055(2011)04-0842-06

合成气扩散燃烧的 OH-PLIF 测量

郭培卿, 臧述升, 葛 冰, 田寅申

(上海交通大学 机械与动力工程学院

动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 为了解中低热值合成气在燃气轮机燃烧室中的燃烧特性, 利用平面激光诱导荧光(PLIF)法, 对模型燃烧室内 CH_4 和具有不同 C-H 比的合成气旋流扩散火焰开展实验研究. 实验结果表明, CH_4 与合成气火焰呈现出截然不同的火焰形状, 瞬态 OH-PLIF 图像揭示了它们具有湍流火焰的共同特征, 且火焰都稳定在喷嘴出口位置. 相比之下, CH_4 燃烧更加稳定, 通过对火焰核心反应区域的定量分析还发现, C-H 比越高, 合成气火焰的稳定性越差.

关 键 词: 合成气; 扩散燃烧; 平面激光诱导荧光; 燃烧不稳定性; 旋流燃烧

中图分类号: TK16

文献标志码: A

OH-PLIF measurement of syngas diffusion flame

GUO Pei-qing, ZANG Shu-sheng, GE Bing, TIAN Yin-shen

(Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of Ministry of Education,
School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Planar laser induced fluorescence (PLIF) measurement was conducted on swirling non-premixed flame in a model combustor, firing CH_4 and syngas with different C-H ratios, in order to study the combustion characteristics of mid-caloric syngas flame in a gas turbine combustion chamber. Although quite different flame shapes were found between CH_4 and syngas flame, instantaneous OH-PLIF images demonstrated the common turbulent flame features. Results also show that both flames are stabilized at the exit of the fuel injector, but CH_4 flame burns more steadily. Quantitative analysis of flame reaction core shows that flame stability deteriorates with the increase of C-H ratio.

Key words: syngas; non-premixed flame; planar laser induced fluorescence (PLIF); combustion instability; swirling combustion

整体煤气化联合循环(IGCC)系统的整体效率显著高于将煤炭燃料直接用于蒸汽轮机发电, 同时温室气体排放量明显降低, 因此 IGCC 技术具有重要的战略意义, 是目前世界公认的未来能源清洁高效利用的重要发展方向^[1]. IGCC 系统要求燃气轮机能够高效洁净地燃烧煤炭气化后产生的合成气, 合成气中普遍含有 CH_4 , H_2 , CO 等

多种可燃成分, 中热值合成气的热值约为天然气热值的 1/3 左右. 为了有效降低 NO_x 排放, 通常在合成气进入燃烧室前掺入 N_2 , H_2O , CO_2 等稀释剂进行稀释^[2]. 但稀释剂的加入会导致燃烧的稳定性变差, 目前工业燃气轮机多采用旋流的方式组织燃烧室内部流场, 增强火焰稳定性, 同时也适用于合成气燃气轮机^[3]. 由于合成气中可燃成

收稿日期: 2010-04-14; 修订日期: 2010-06-02

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2007CB210102)

作者简介: 郭培卿(1982—), 男, 江苏启东人, 博士生, 主要从事湍流燃烧的激光可视化研究.

分的燃烧机理不同于 CH_4 , 国内外许多学者就合成气燃烧展开了大量的实验研究^[4-8], 其中非接触式光学测量手段越来越受到重视和应用. 火焰的反应区是燃烧机理研究和工业应用中最关心的区域, 开展火焰反应区结构的研究, 能为工业上高稳定性、高效率、低排放的喷嘴及燃烧室的设计提供帮助^[9]. 由于合成气的成分构成随煤炭燃料的种类、煤气化生产工艺和处理技术的不同变化很大, 开展针对合成气燃烧规律的研究是十分必要和紧迫的. 本文的研究对象为模型燃烧室中的非预混旋流火焰, 目的在于模拟燃气轮机燃烧室内的合成气火焰. 在实验中, 选用了多种不同组分含量的合成气, 并以 CH_4 作为参考燃料, 利用平面激光诱导荧光(PLIF)法测量燃烧中间产物 OH 自由基, 研究了 CH_4 改烧合成气后火焰形态的变化规律, 以及合成气碳氢比对燃烧特性的影响规律.

1 实验及测量装置

1.1 实验装置

本文使用的模型为轴对称旋流扩散燃烧室, 四周安装有石英玻璃加工而成的光学测量窗口. 旋流器安装在燃烧室头部, 旋流器的叶片安装角

为 54° , 旋流数为 1.28, 燃料经位于旋流器中心、直径为 4 mm 的燃料喷嘴进入燃烧室. 空气经整流后通过旋流器, 在燃烧室突扩以及旋流作用下, 在喷嘴下游处形成低速回流区, 并成为稳定的点火源.

实验中使用的合成气由 H_2 , CO 和 N_2 构成, 分别通过各自管道进入混合腔, 经充分混合后进入燃烧室, 三种气体的流量通过流量计与控制阀分别控制, 从而实现合成气成分的变化, 同时选择 CH_4 作为参考燃料, 流量单独控制, 如图 1 所示. 空气流量的调节通过变频器实现.

1.2 PLIF 系统

在实验中使用 PLIF 技术测量 OH 自由基的浓度, 用来标记火焰的前锋面. 虽然严格意义上的 OH-PLIF 荧光信号是温度、浓度及其他光谱参数的函数, 在本文工况范围内可以认为 OH 浓度与荧光信号强度成正比^[10].

PLIF 系统如图 1 所示. 由 Nd:YAG 泵浦激光器产生波长 532 nm 的脉冲激光, 经染料激光器后波长变为 562.4 nm, 再经倍频晶体倍频为波长 281.2 nm 的紫外激光, 该波长可用以激发 OH 基的 $A^2\Sigma^+-X^2\Pi(1,0)$ 跃迁的 $R_1(8)$ 线, 紫外端的激

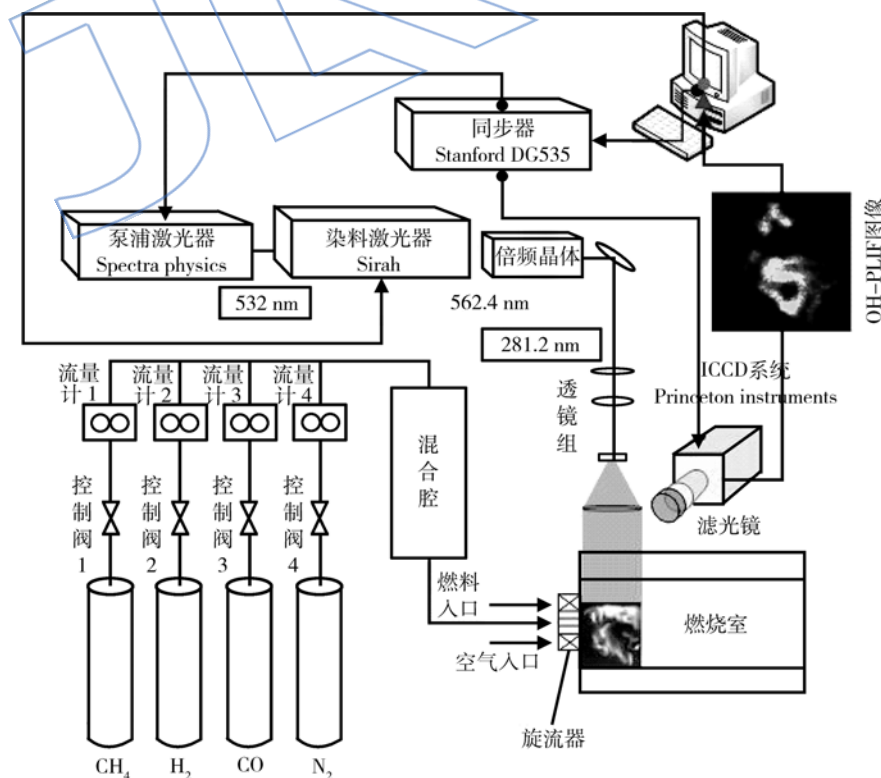


图1 合成气旋流扩散燃烧室及 PLIF 测量系统

Fig. 1 Swirling non-premixed syngas combustion chamber with PLIF system

光能量约为 4 mJ/脉冲,经过由凸透镜、柱透镜组成的透镜组后形成高 70 mm、厚约 0.8 mm 的片光穿过火焰中心. OH 荧光信号由 ICCD(intensified charge-coupled device)相机接收,在镜头前装有 UG11 与 WG305 组成的复合滤光片,以减少火焰辐射及背景杂散光的干扰. 激光与 ICCD 拍摄时刻间的脉冲延时由 DG535 同步器调整.

ICCD 拍摄区域如图 1 所示,包含 1024 像素 $\times$ 1024 像素,图像的左侧边缘与旋流器出口重合,图像的空间分辨率高于 0.08 mm $\times$ 0.08 mm $\times$ 0.8 mm,拍摄门宽为 100 ns,增益为 128,每个工况拍摄连续 500 幅有效瞬态 OH-PLIF 照片,并以相同参数获取 100 幅背景信息,在后处理时进行背景消除.

1.3 工 况

在实验中,首先使用中热值合成气,由体积比为 0.373 : 0.478 : 0.149 的 H_2 : CO : N_2 组成,低位热值 (LHV) 为 10 MJ/m³. 空气流量保持 0.053 34 kg/s 不变,分别改变 CH_4 及合成气的流量,然后保持合成气燃料和空气流量不变,改变合

成气燃料中的 C-H 比, N_2 含量保持 14.9% 不变.

各工况使用的燃料及流量如表 1 和表 2 所示. 工况 A 组使用燃料 a(CH_4); 工况 B 组使用燃料 b(C-H 比为 1.28 的合成气); 工况 C 组保持燃料流量不变,使用不同 C-H 比的合成气. 燃料流量的单位为 L/min.

表 1 燃料组成

Table 1 Fuel composition

燃料	CH_4 /%	H_2 /%	CO /%	N_2 /%	LHV/ (MJ/m ³)	C-H 比
a	1				38.36	
c1		60.8	24.4	14.9	9.62	0.40
c2		49.2	35.9	14.9	9.84	0.73
c3		42.6	42.5	14.9	9.96	1.00
c4		37.3	47.8	14.9	10.06	1.28
c5		31.5	53.6	14.9	10.16	1.70
c6		24.3	60.8	14.9	10.30	2.50
c7		17.0	68.1	14.9	10.43	4.00

表 2 实验工况

Table 2 Experiment conditions

工况	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6	C1	C2	C3	C5	C6	C7
燃料种类				a						c4			c1	c2	c3	c5	c6	c7
燃料流量/ (L/min)	14	21	28	42	56	70	14	21	28	42	56	70				28		

2 实验结果与分析

2.1 CH_4 与中热值合成气的火焰结构分析

在后处理过程中,对 500 幅有效瞬时 OH-PLIF 图像进行平均后得到 OH 分布的平均场,利用该平均场进行火焰结构定量分析,火焰张角 α 、火焰反应区长度 L 及反应区宽度 W 的定义如图 2 所示.

图 3(a)为 CH_4 与中热值合成气在不同燃料流量下平均后的 OH-PLIF 图像. 需要说明的是,由于在湍流火焰中,反应区内过平衡时产生的 OH 要显著高于化学平衡下产生的 OH,因此在 OH-PLIF 图像中,产生最多 OH 区域最有可能代表的是过平衡状态下的 OH^[11],常压下过平衡 OH 的持续时间能够达到 ms 量级,产生中等 OH 区域则代表了高温下形成的化学平衡状态下的

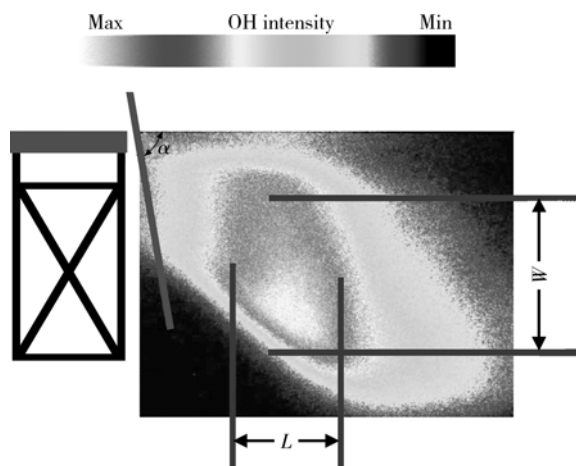


图 2 OH-PLIF 示意图及火焰结构

Fig. 2 OH-PLIF sample image and flame structure definition

OH,通常出现在回流区内^[12],在回流区中,高温燃烧产物加快了新鲜燃气的点火,起到了稳定火焰的作用.由于温度的升高是化学反应放热的结果,OH 存在的区域亦表示当地温度较高.

OH-PLIF 平均图像表明,火焰具有良好的对称结构. CH_4 火焰呈花瓣形,反应从燃烧室入口已经开始进行,一直延伸到下游,OH 普遍存在于燃料射流与旋流空气之间,燃料喷嘴所在的轴线上并无明显的 OH 分布,说明轴线上分布着尚未参与反应的低温燃料,经过回流与旋流空气混合,在高温燃烧产物作用下发生化学反应.图像左下方的暗色区域为通过旋流器后的新鲜空气.合成气燃烧时则呈现狭窄的长条形火焰,除了最高燃气流量下火焰略微离开喷嘴以外,火焰均稳定燃烧于喷嘴出口,火焰锋面仅出现在燃料射流周围,在中心回流区内并无化学反应发生.合成气燃烧时,喷嘴出口附近的火焰张角变化不大,但随着燃气流量的增加,火焰根部逐渐变细,下游张角却越来越大,不利于火焰的稳定.

图 3(b)为对应工况下的瞬时 OH-PLIF 图像.

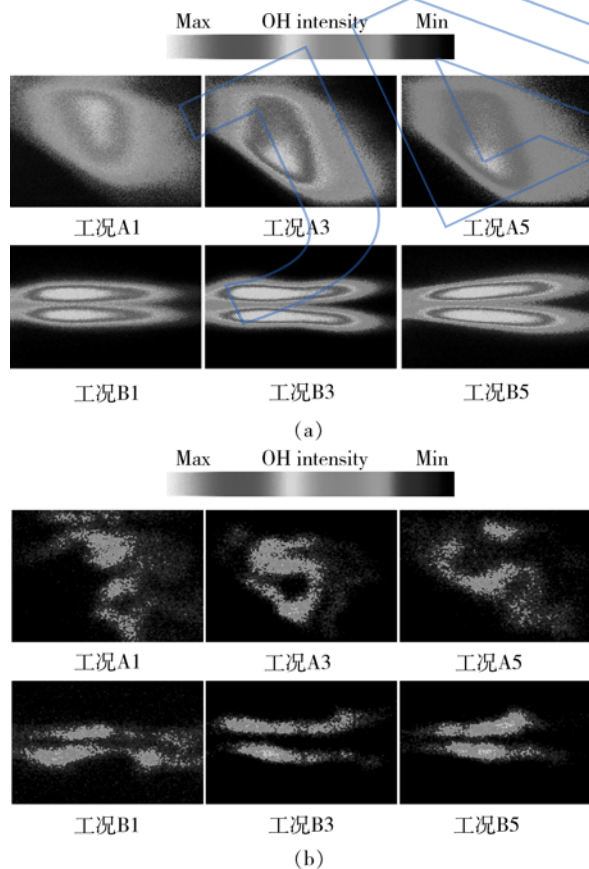


图3 CH_4 与合成气火焰的 OH 分布

Fig. 3 OH distribution of CH_4 and syngas flame

OH 代表的火焰锋面呈现出褶皱和卷曲形态,主要出现在燃料射流与回流区边界间,反映出化学反应区域及流场的湍流特性.在 CH_4 火焰中,几乎所有的 OH-PLIF 图像均显示连续分布的 OH,而中热值合成气则呈现出 OH 分布即火焰锋面的不连续性,暗示出现局部熄火与重新点火,表明在相同燃气流量下 CH_4 燃烧时比中热值合成气更加稳定.

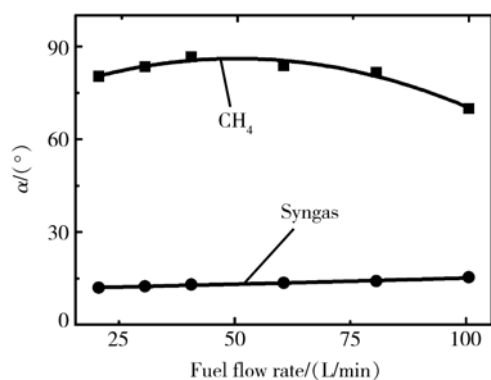
随着燃料流量的增加,对火焰的稳定性有着三方面的影响.燃料量的增加有利于燃料与空气间的混合,但同时也会降低当地燃烧速率^[10],同时增大了燃烧室内的当量比.从结果来看,在 CH_4 火焰中,最高 OH 浓度随着燃气流量的增加而减弱,说明了在高工况下燃烧的稳定性变差.对于中热值合成气,瞬态 OH 分布显示的火焰面积随燃料流量的增加有所增大,有可能抵消下游火焰张角变大对稳定性造成的不利影响.

图 4 显示了图 2 中所定义的火焰结构随燃气流量变化的规律.由图 4(a)可知, CH_4 火焰的张角随燃气流量的增加在 $70^\circ \sim 85^\circ$ 之间变化,中热值合成气火焰张角远小于 CH_4 ,变化范围为 $12^\circ \sim 15^\circ$.图 4(b)和(c)分别表示了火焰的主要反应区在轴向和径向上的尺寸变化.合成气火焰较长, CH_4 火焰较宽,两者的变化规律基本一致,即反应区的尺寸随燃气流量的增大先减小后增大.从图 4 中还可以看出,燃料流量的变化对 LHV 合成气火焰反应区结构的影响要明显小于 CH_4 .

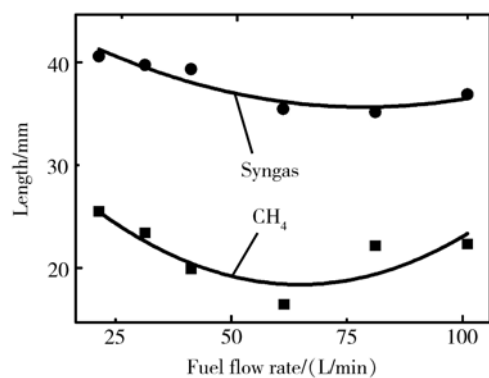
2.2 C-H 比对中热值合成气火焰结构的影响

图 5 显示的是 C 组工况,即不同 C-H 比下中热值合成气火焰的平均及瞬时 OH-PLIF 图像.由平均场可知,在本文所研究范围内,合成气火焰均可在喷嘴出口稳定燃烧,当合成气中 C-H 比较低时,火焰根部反应区域较大,下游火焰的张角较小,有利于火焰的稳定.随着燃料中 CO 的增加和 H_2 的减少,喷嘴出口处的反应区明显缩小,同时火焰下游张角逐渐在径向方向上扩展,形成典型的 V 字形火焰.瞬态 OH 浓度分布也证实,随着 C-H 比的提高,容易诱发火焰的不稳定燃烧,以至于在 C-H 比为 2.5 和 4.0 工况下,经常出现局部熄火现象,甚至多处局部熄火的区域在一幅 OH-PLIF 图像中同时出现.当进一步增加 C-H 比后,火焰变得更加不稳定,无法维持长时间的稳定燃烧.

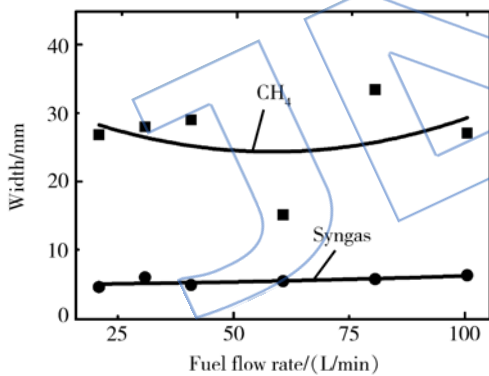
图 6 分别显示了不同 C-H 比下火焰张角和反应区尺寸的变化.由图可知,喷嘴出口处的火焰



(a)



(b)



(c)

图4 火焰结构与燃气流量的关系

Fig. 4 Flame structure changes with different fuel flow rates

张角随 C-H 比的增加逐渐变小, 火焰变得更加细长, 反应区尺寸的变化应从两方面理解, 在 C-H 比小于 1.0 时, 反应区尺寸随 C-H 比的增加而减小, 这反映了火焰根部反应区的变化, 当 C-H 比大于 1.0 后, 反应区尺寸逐渐增大, 所反映的是随 CO 含量的增加, 下游火焰张角逐渐扩大, 反应区被逐渐拉长. C-H 比为 4.0 工况下, 由于 H_2 含量急剧减少, 火焰温度的下降有可能是导致该工况下 OH 分布区域减小的重要原因.

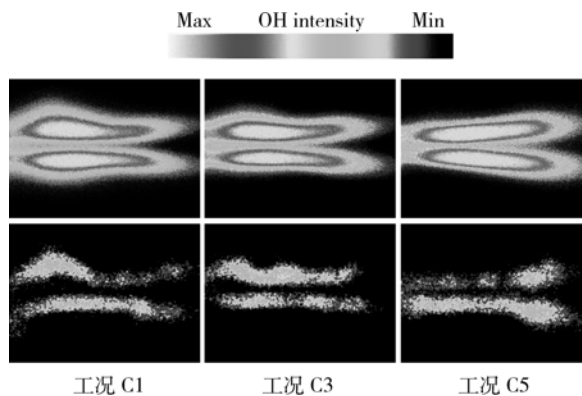
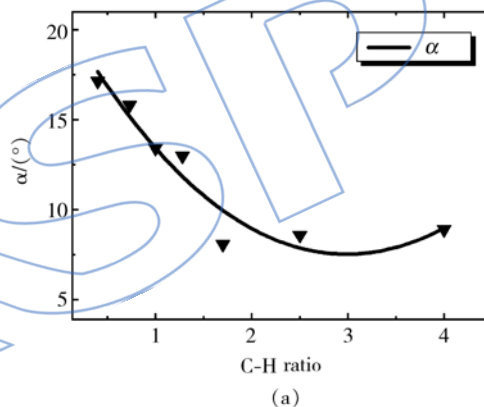
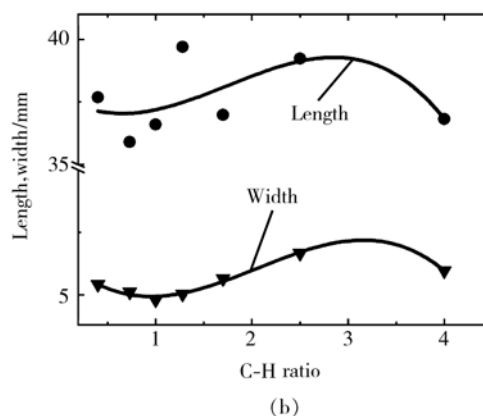
图5 不同 C-H 比下合成气火焰的 OH 分布
(上方: 平均, 下方: 瞬时)

Fig. 5 Average (up) and instantaneous (down) OH distribution of syngas flame with different C-H ratios



(a)



(b)

图6 C-H 比对火焰结构的影响

Fig. 6 Flame structure affected by C-H ratio

3 结论

本文利用 OH-PLIF 系统对 CH_4 及多种 C-H 比的中 LHV 合成气旋流扩散火焰进行实验研究, 通过观察 OH 自由基的瞬态和平均分布, 获

得了不同燃料成分对火焰结构和燃烧稳定性的影响,可以得出以下结论:

1) 在实验范围内,CH₄ 及合成气火焰均呈现出褶皱、卷曲等典型的湍流燃烧特性,在相同燃气流量下,CH₄ 火焰的稳定性明显好于合成气;

2) 相同燃气流量下,CH₄ 火焰呈花瓣形,合成气燃烧时则呈现狭窄的长条形火焰,并且均稳定在喷嘴出口,且合成气火焰张角远小于 CH₄,燃料流量的变化对 CH₄ 火焰反应区尺寸的影响更加明显;

3) 燃用较低 C-H 比的合成气时,火焰根部反应区域较大,下游火焰的张角较小,有利于火焰的稳定,随着 C-H 比的增加,逐渐形成典型的 V 字形火焰,且经常出现局部熄火,容易诱发火焰的不稳定燃烧。

参考文献:

- [1] Daniele S, Jansohn P, Boulouchos K. Flame front characteristic and turbulent flame speed of lean premixed syngas combustion at gas turbine relevant conditions[R]. ASME GT2009-59477, 2009.
- [2] 张永生,王岳,张哲巖,等. 合成气稀释旋流扩散火焰稳定性研究[J]. 燃气轮机技术, 2007, 20(3): 29-34.
ZHANG Yongsheng, WANG Yue, ZHANG Zhedian, et al. Study on the stability of the syngas diluted swirling diffuse flame[J]. Gas Turbine Technology, 2007, 20(3): 29-34. (in Chinese)
- [3] Casarsa L, Micheli D, Pediroda V, et al. Investigations of pyrolysis syngas swirl flames in a combustor model[R]. ASME GT2009-59610, 2009.
- [4] 张永生,穆克进,张哲巖,等. 同向和反向合成气旋流扩散燃烧研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1): 63-68.
ZHANG Yongsheng, MU Kejin, ZHANG Zhedian, et al. Study on the co-swirl and counter-swirl combustion of the syngas diluted diffuse flame[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(1): 63-68. (in Chinese)
- [5] Hasegawa T, Sato M, Nakata T. A study of combustion characteristics of gasified coal fuel[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123(1): 22-32.
- [6] Strakey P, Sidwell T, Ontko J. Investigation of the effects of hydrogen addition on lean extinction in a swirl stabilized combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 3173-3180.
- [7] Marley S K, Welle E J, Lyons K M. Combustion structures in lifted ethanol spray flames[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(2): 254-257.
- [8] Tsurikov M, Meier W, Geigle K P. Investigations of a syngas-fired gas turbine model combustor by planar laser techniques[R]. ASME GT2006-90344, 2006.
- [9] Le C T, Dagaut P. Oxidation of H₂/CO₂ mixtures and effect of hydrogen initial concentration on the combustion of CH₄ and CH₄/CO₂ mixtures; experiments and modeling[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(1): 427-435.
- [10] Yamamoto K, Ozeki M, Hayashi N, et al. Burning velocity and OH concentration in premixed combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(1): 1227-1235.
- [11] Ax H, Stopper U, Meier W, et al. Experimental analysis of the combustion behavior of a gas turbine burner by laser measurement techniques[R]. ASME GT2009-59171, 2009.
- [12] Stopper U, Aigner M, Meier W, et al. Flow field and combustion characterization of premixed gas turbine flames by planar laser techniques[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131(2): 021504. 1-021504. 8.