

# 同向和反向合成气旋流扩散燃烧研究

张永生, 穆克进, 张哲巛, 王岳, 肖云汉

(先进能源动力重点实验室(中国科学院工程热物理研究所), 北京市 海淀区 100190)

## Study on the Co-swirl and Counter-swirl Combustion of the Syngas Diluted Diffuse Flame

ZHANG Yong-sheng, MU Ke-jin, ZHANG Zhe-dian, WANG Yue, XIAO Yun-han

(Key Laboratory of Advanced Energy and Power, Institute of Engineering Thermophysics,  
Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100190, China)

**ABSTRACT:** The diluted syngas diffuse swirl flame was studied. The OH radical, the flame temperature and the pollutant emission was individually analyzed. The results show that the combustion stability of diffuse swirl flame is controlled by the recirculation and diffuse mixture. The enhancement of the recirculation or the diffuse mixture can be favorable to the combustion stability. Comparing the counter-swirl, the co-swirl of fuel and air has more OH radical and heat is taken to the recirculation zone, thus this is favorable to the combustion stability. When the swirl number of fuel and air is small, mixture is important to the combustion stability. For counter-swirl of fuel and air, the flame is more stable than that for co-swirl more intense mixture. Although the NO<sub>x</sub> emission is influenced by the diffuse mixture, the thermal mechanism is the main factor for the NO<sub>x</sub> emission in this experiment. For the CO emission, there are larger index of CO emission when the power of flame is lower due to its lower temperature. In this experiment, the CO emission is near to zone when the flame power is larger than 34 kW.

**KEY WORDS:** syngas; co-swirl and counter-swirl; OH; combustion stability; pollutant emission

**摘要:** 针对同向和反向合成气旋流扩散火焰燃烧开展研究, 测量了燃烧中间产物 OH 自由基浓度、火焰温度及污染物的排放。实验结果表明, 燃烧的稳定性受旋流产生的回流区和扩散混合两方面的因素控制, 加强回流有利于燃烧稳定, 加强混合也有利于燃烧稳定。燃料和空气同向旋流和反向旋流相比, 总回流量较大, 能够向回流区卷吸更多的活性自由基 OH 和热量, 从而有利于燃烧稳定。当燃料和空气的旋流数

比较小时, 混合对燃烧的稳定性也会产生重要影响, 空气和燃料的反向旋流由于混合较为强烈从而稳定性比空气和燃料同向旋流时要好。尽管NO<sub>x</sub>排放受混合的影响, 但针对文中的实验, 主要是热力型机理对NO<sub>x</sub>的排放起作用。在CO排放中, 较低功率下由于温度较低导致CO排放指数较高, 实验中当功率大于34kW时, 温度较高, CO排放接近于零。

**关键词:** 合成气; 同向和反向旋流; OH 自由基; 燃烧稳定性; 污染物排放

## 0 引言

煤气化产生的低热值合成气在燃气轮机中的安全、高效和低污染燃烧是整体煤气化联合循环(integrated gasification combined cycle, IGCC)系统的重要问题<sup>[1-3]</sup>。通过旋流组织燃气轮机中的燃烧是最常用和可靠的方法。一般通过扩散旋流组织流场和燃烧其效率都能够达到比较高的参数。为了实现低污染尤其是低NO<sub>x</sub>排放, 通过贫预混旋流燃烧或通过对流场的组织(如双旋流空气低NO<sub>x</sub>燃烧<sup>[4]</sup>)来实现。前者由于理论上能够较理想地降低燃烧区的温度而被广泛关注, 并有一定规模的应用。

传统上天然气是燃气轮机的主要燃料, 对于主要可燃成分是CO和H<sub>2</sub>的合成气, 由于氢气火焰传播速度高, 采用贫预混燃烧可能会带来回火的危险。因此出于安全考虑, 一般选择扩散燃烧。但由于氢气燃烧平衡温度比天然气高, 一定成分的合成气燃烧可能会有浓度较高的NO<sub>x</sub>排放<sup>[5]</sup>, 因此必须寻求合适的途径来解决。

通过对燃料和空气的稀释, 降低参加化学反应的反应物浓度, 从而降低燃烧温度是比较有效的途径<sup>[5-7]</sup>。但稀释剂的添加要综合考虑整体效率和成本, 而且其加入会导致燃烧稳定性变差, 故需要对

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划项目(863 计划)(2006AA05A104); 国家自然科学基金项目(50576098)。

The National High Technology Research and Development of China(863 Program)(2006AA05A104); Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50576098).

燃烧流场进行良好的组织。在天然气燃烧中双旋流空气能够降低 $\text{NO}_x$ ，这是因为 $\text{NO}_x$ 排放依赖于未燃混合物的均匀程度和燃气在燃烧室的停留时间<sup>[8]</sup>。快速混合增加了混合的均匀程度和缩短了 $\text{NO}_x$ 形成的特征时间，所以是降低 $\text{NO}_x$ 的方法之一。双旋流空气加强了燃料和空气的混合，从而空气双旋流具有明显降低 $\text{NO}_x$ 的作用<sup>[4]</sup>。

燃烧稳定性是燃烧的首要问题，对燃烧稳定性的判断一般都是看火焰是否发生热力熄火、是否产生推举火焰以及是否发生吹熄现象<sup>[9-10]</sup>。这些现象的发生受空气当量比、燃料和空气流量、流速以及燃烧结构几何形状等影响。一般工程应用中流量较大，热力熄火不易发生，但如果流场组织不好，可能会发生吹熄。在双旋流的研究中，不同通道的旋流气体同向旋流和反向旋流导致的稳定性也有所不同。Merkle、Ateshkadi、Durbin等<sup>[11-13]</sup>对烷烃燃料、液体燃料的研究表明反向旋流比同向旋流的燃烧稳定性要好。

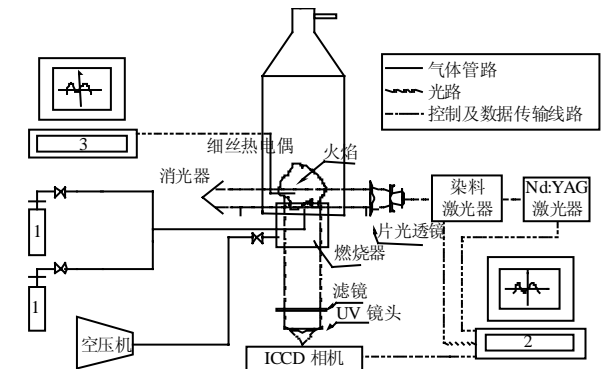
在这些研究中，同向及反向旋流都是针对空气双旋流，燃料旋流没有考虑，因为相对于空气，其燃料的流量很小，动量很小，从而对流场的影响较小。文献[4]对6个不同构造的多孔燃料喷嘴在双旋流和传统旋流燃烧器中进行了实验，结果表明燃料喷嘴的数量、尺寸、孔位置和燃料喷射角度对 $\text{NO}_x$ 排放影响很小，认为空气和燃料的混合主要是由空气旋流所控制。但对于低热值合成气燃气轮机而言，为了达到相同的功率，燃料流量大大增加，从而其动量较大，燃料对流场的影响必须考虑进来。

除了 $\text{NO}_x$ 排放，由于合成气成分中有较多的CO，CO在低温下容易发生不完全反应，从而也会导致CO排放升高。

基于以上考虑，针对合成气稀释扩散燃烧开展空气和燃料旋流的研究是必要的，本文主要探索这些燃烧条件下燃烧稳定性及污染物排放特性。

## 1 实验系统及研究方法

图1是实验系统图，旋流的燃料和空气在燃烧器中混合形成扩散燃烧火焰，通过平面激光诱导荧光法(planar laser-induced fluorescence, PLIF)测量燃烧中的OH自由基，通过细丝热电偶测量火焰及燃烧室出口温度，用烟气分析仪来分析污染物的排放情况。稳定性的实验是针对开放火焰研究的，污染物排放的实验针对燃烧室中火焰开展。



1—燃料气及稀释氮气；2—PLIF的触发、同步控制、图像采集和实时显示及处理系统；3—温度数据采集系统。

图1 实验系统图

Fig. 1 Schematic of system setup

实验中通过改变空气和燃料的旋流方向、旋流结构来研究空气和燃料的旋向及强度。空气旋流强度的调节通过可动塞块旋流器来实现，燃料旋流的调节是通过更换具有不同旋转偏角的燃料喷嘴来实现，空气和燃料旋转方向的配合通过调节燃料喷嘴的方向来实现<sup>[3]</sup>。图2是可动塞块旋流器、燃料喷嘴及燃烧室示意图，空气从固定块和移动块间的缝隙径向和切向流入，通过移动块的移动，调节径向进气和切向进气的比例，从而实现空气旋流强度的调节<sup>[14]</sup>。燃料旋流是通过在燃料喷嘴中布置的若干斜孔实现的，斜孔在径向方向的倾角为 $14^\circ$ 。扩张段高与空气喷口直径 $D$ 相等，扩张段扩张半角为 $35^\circ$ 。为了增加光学通透，更好地研究燃料从喷嘴出来后在扩张段内的情况，研究中扩张段采用石英玻璃加工。当空气与燃料在扩张段内相遇并混合后，点燃形成扩散火焰。实验中为了了解燃烧中的排放情况，在上面的基础上设计了燃烧室如图2，从而方便测量污染物排放。

通过直径为 $0.3\text{ mm}$ 的S型对焊热电偶测量温度，其中开放火焰测量的是火焰中轴的温度，具有

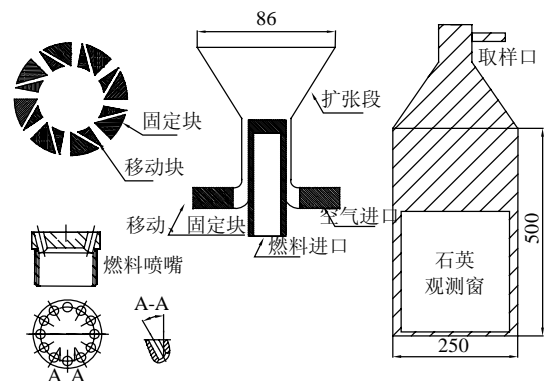


图2 可动塞块旋流器及燃烧室示意图

Fig. 2 Schematic of movable block swirler and combustor

燃烧室的火焰测量的是燃烧室出口的温度。OH 自由基通过非接触光学 PLIF 法来测量，PLIF 系统由光源、荧光探测、控制和数据采集分析模块组成，光源部分采用 Spectra-physics 公司的 Nd: YAG 激光器、Sirah 公司的染料激光器，实验测量中染料激光器输出倍频波长是 281.925 nm。荧光探测通过 La Vision 公司的高分辨率的 ICCD 相机来实现。污染物通过德国 MRU VRAIO 增强型工业气体连续监测仪测量。

实验中以氮气稀释的合成气为燃料。燃料成分为  $H_2$ 、 $CO$ 、 $N_2$ ， $CO: H_2: N_2$  的体积比为 0.285: 0.225: 0.49，体积热值为  $6 \text{ MJ/m}^3$ 。在判断燃烧稳定性时为了使得吹熄的特征较为明显，燃料流速设为  $60 \text{ m/s}$ ，空气流速设为  $50 \text{ m/s}$ 。由于开放火焰测量火焰温度时流速太高会使得测量的细丝热电偶被吹断，因此流速选取较低，燃料和空气的流速是前者的一半。同时为了更广泛测量扩张段附近的温度分布，扩张段高度为原来的  $1/3$ 。虽然几何结构有改变，但不会影响本文结论的分析。在具有燃烧室的实验中，热量太多会导致燃烧室壁面温度过高，因此也取较低的流速。

数值模拟是通过商业软件 Fluent 进行的，流动模型采用 Realizable  $k-\varepsilon$  模型，反应动力学参考 Drake 等<sup>[15]</sup>推荐的详细化学反应机理，将 22 种组分、67 步基元反应导入 Flamelet 燃烧模型，针对实验中的燃烧器建模进行三维数值模拟，模拟中对针对 60 万、100 万的网格进行了适应性研究，网格数量对结果没有太大影响，因此本文模拟中确定网格数量 60 万，如图 3 所示。由于反应涉及到的化学机理比较复杂，模拟通过并行计算实现。

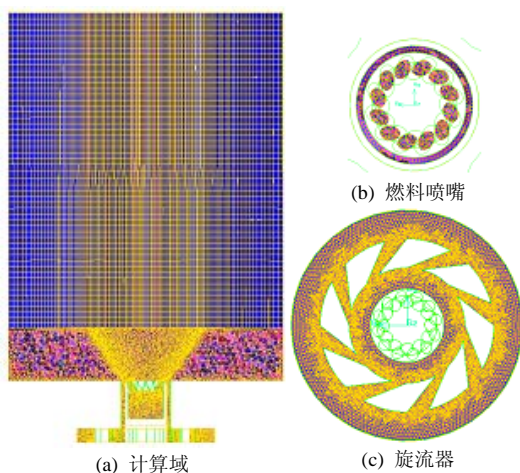


图 3 计算域及燃料、空气旋流器网格图  
Fig. 3 Computed zone, fuel and air swirler grids

## 2 结果及讨论

### 2.1 火焰稳定性分析

常压下开放火焰的功率为  $68 \text{ kW}$ 。稳定性是通过稳定燃烧的火焰、发生推举的火焰和火焰发生吹熄等现象的比较来判断，后两者为不稳定的情况。实验中通过调节燃料旋流数  $S_{\text{fuel}}$  和空气的旋流数  $S_{\text{air}}$  来研究相同燃料和空气流速下不同旋流数下的稳定性，发现当燃料旋流数和空气旋流数都较大的时候，无论燃料空气同向旋流还是反向旋流，其燃烧稳定性都较好。而当两者的旋流数较小时，燃料和空气反向旋流更加容易稳定，结果如图 4 所示。实点所处的区域为稳定燃烧区，而空点所处的区域为发生推举火焰到熄火的不稳定区域，此处不容易发生稳定的燃烧。而空点画叉的区域为发生科恩达效应稳定的区域，由于科恩达效应会有一些的滞后效应<sup>[16]</sup>，因此在这一区域，空气流量上行调节到工况和下行调节到工况会有不同的结果，下行调节易于出现火焰贴壁面燃烧的现象，而上行调节易于出现火焰脱离壁面的火焰。

对于旋流燃烧，由于回流区的存在，回流的热产物能够加热反应物，同时回流的自由基能够促进燃烧反应，因此有利于燃烧的稳定性。而对于扩散燃烧，燃料和氧化剂的充分混合是燃烧的先决条件。

图 5 是模拟计算的燃料和空气旋流数最大时扩

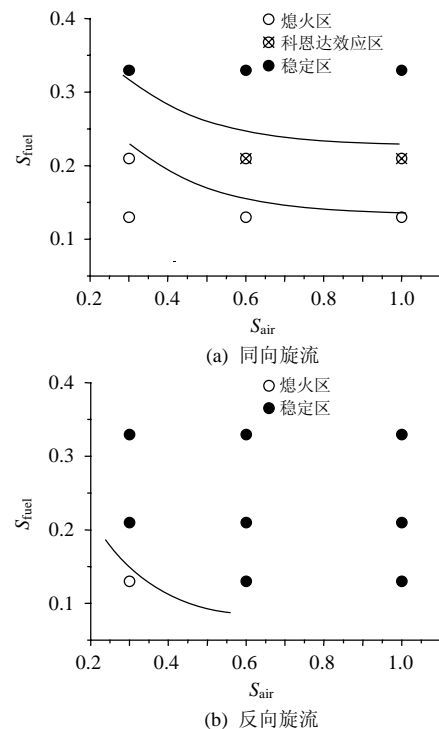


图 4 旋流稳定性  
Fig. 4 Stability of the swirl combustion

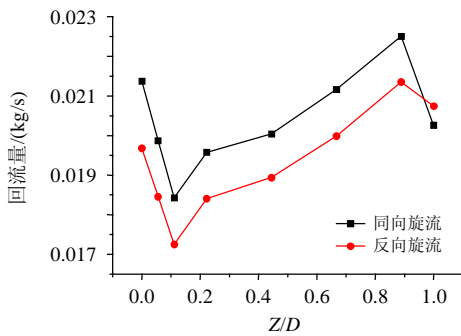


图5 回流量模拟对比图

Fig. 5 Comparing of circumfluence mass flow by simulation

张段内回流量沿轴向的变化图, 由于燃烧反应主要是发生在扩张段壁面附近, 从该处其产生的热量和自由基对稳定燃烧开始起作用, 因此需要从这里开始考虑计算回流量。从图5的结果可见在扩张段内部相同的截面上同向旋流的回流量要比反向的回流量多。

同向、反向旋流的不同主要是切向速度不同。反向旋流情况下由于燃料和空气的切向速度方向相反, 导致切向速度快速衰减, 轴向和径向方向上速度、动量的耗散更快, 从而会导致回流区的负向压力梯度更大, 即回流区更集中、强度会更大, 但回流区区域范围会更小, 这与模拟计算的结果一致, 同时也被文献[11]和[17]对流场的测量所证明。因此当计算扩张段内的回流量时, 就有可能导致反向旋流中卷吸到回流区的热量和自由基减少。

图6是火焰照片和PLIF测量的OH自由基的对照, 图中的OH自由基图是对应工况中100张瞬时PLIF图像的平均图像, 高亮度的区域表示OH自由基浓度较高的位置。从图中可见玻璃扩张段内和扩张段上面部分卷吸到回流区的OH与模拟得到的结论一致。同向旋流中回流区内的OH浓度较高, 卷吸量较大, 可以说回流量较大。同时从拍摄的数码照片可以看出, 同向旋流要比反向旋流的火焰短且粗, 这也应该是总的回流量较大的原因造成的。从回流的角度考虑, 由于同等条件下回流多可以将更多的高温燃气和活性自由基带回到燃烧器出口, 从而加强根部的燃烧, 有利于燃烧的稳定。

由于旋流扩散火焰的燃烧稳定性主要受回流和扩散混合的影响, 因此燃料和空气旋流数都比较小, 回流影响较弱时, 燃料和氧化剂的扩散混合对燃烧稳定性就起了重要作用。而实验结果表明, 当燃料和空气旋流数比较小时, 反向旋流更有利于燃烧。这是因为反向旋流中燃料和空气的切向速度差

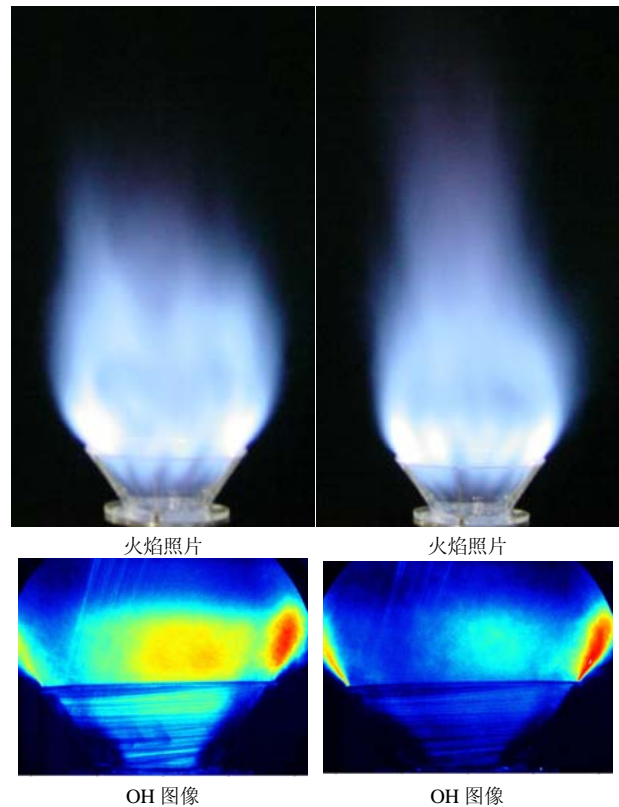
(a) 同向旋流,  $S_{air}=1, S_{fuel}=0.33$  (b) 反向旋流,  $S_{air}=1, S_{fuel}=0.33$ 

图6 火焰照片及测量的OH图像

Fig. 6 Flame photographs and the OH images

较大, 加强了相互间的混合, 即Nathan认为的增加宏观尺度上的一致性会降低分子混合的速率<sup>[18]</sup>。由于反向旋流混合比同向旋流混合强烈, 从而有利于燃烧的发生和稳定燃烧。

实验中对相应燃料流量和空气流量为图6中一半工况的火焰轴向温度进行了测量, 结果证实了上面对流场及OH自由基的分析。图7是其测量结果, 可见同向旋流的轴向中心温度比反向旋流要高, 这应该是由于回流强烈, 向中心卷吸的高温烟气较多的结果。

通过上面的分析可见, 在旋流扩散燃烧中, 燃烧的稳定性的受旋流产生的回流区和扩散混合两方

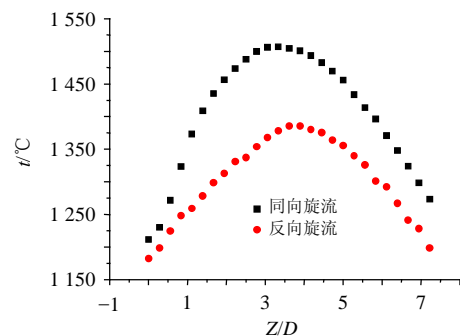


图7 轴线温度分布图

Fig. 7 Temperature distributions of axial

面的因素控制, 加强回流有利于燃烧稳定, 加强混合也有利于燃烧稳定。燃料和空气同向旋流和反向旋流相比, 总回流量较大, 能够向回流区卷吸更多的活性自由基和热量, 从而有利于燃烧稳定。当两者旋流数比较小时, 混合对燃烧的稳定性的影响, 空气和燃料的反向旋流由于混合较为强烈从而稳定性比空气和燃料同向旋流时要好。

## 2.2 污染物排放及出口温度

针对燃烧室内的火焰, 由于燃料流速太大对应功率较大, 导致的壁面温度偏高有可能损坏燃烧室, 因此在小燃料流速下开展研究。图 8 是对应图 7 工况的 $\text{NO}_x$ 排放指数 $E(\text{NO}_x)$ 曲线, 可见反向旋流有比同向旋流更高的排放指数。由于合成气燃料中不存在含氮化合物, 因此污染物中不含燃料型 $\text{NO}_x$ , 同时由于快速性 $\text{NO}_x$ 含量很低, 因此合成气扩散火焰燃烧中 $\text{NO}_x$ 的生成机理主要是热力型 $\text{NO}_x$ 机理。图 8 反向旋流中燃烧室出口温度如图 9 对应工况所示, 比同向旋流情况下高  $103^\circ\text{C}$ , 表明反向旋流情况下的整体火焰温度比同向情况下高, 这说明热力型机理对 $\text{NO}_x$ 的生成起主要作用。而混合尽管对 $\text{NO}_x$ 排放有一定的影响, 但实验结果表明由于燃料和空气同向反向而导致的不同混合对本实验中 $\text{NO}_x$ 排放的影响相对较小。

由于CO的排放对温度依赖性很强, 在低温下会有很高的排放。本文研究了CO随功率变化的情况, 图 10 是CO排放指数 $E(\text{CO})$ 的情况。可见当功率在  $34.3\text{ kW}$  (对应燃料流速  $30\text{ m/s}$ ) 左右时, CO排放几乎为零。文献[19]中指出当燃气轮机中一次燃烧区温度高于  $1\ 100^\circ\text{C}$  时, CO排放几乎为零, 这和本文大功率下 $E(\text{CO})$ 接近零的结论应该是一致的。但随着功率的降低, 火焰温度降低, 更多的CO不能完全反应, 单位燃料排出的CO升高。另外图 10 显示同向旋流中 $E(\text{CO})$ 比反向旋流的 $E(\text{CO})$ 大, 这可能是由于如图 9 所示的其温度较低造成的结果。

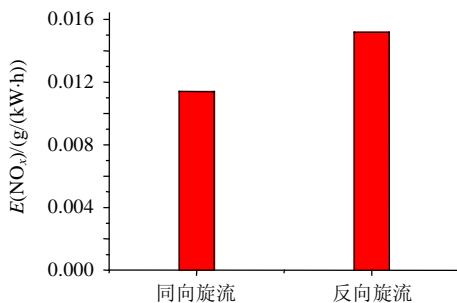


图 8 不同旋向的 $\text{NO}_x$ 排放指数

Fig. 8 Index of  $\text{NO}_x$  emission of the different swirl direction

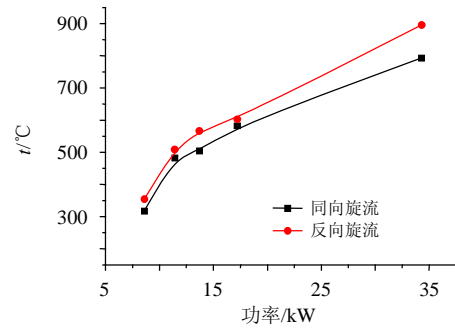


图 9 出口温度

Fig. 9 Exit temperature

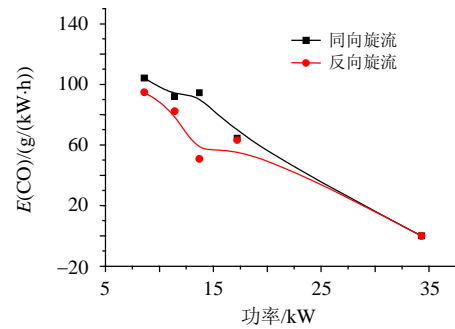


图 10 CO 排放指数

Fig. 10 Index of CO emission

## 3 结论

本文研究了合成气旋流扩散燃烧, 实验结果表明燃烧的稳定性的因素控制, 加强回流有利于燃烧稳定, 加强混合也有利于燃烧稳定。燃料和空气同向旋流和反向旋流相比, 总回流量较大, 能够向回流区卷吸更多的活性自由基 OH 和热量, 从而有利于燃烧稳定。当两者旋流数比较小时, 混合对燃烧的稳定性的影响, 空气和燃料的反向旋流由于混合较为强烈从而稳定性比空气和燃料同向旋流时要好。

本文实验结果表明主要是热力型机理对 $\text{NO}_x$ 的排放起作用。

在CO排放中, 较低的功率下由于温度较低导致CO排放指数较高, 本实验中当功率大于  $34\text{ kW}$  时, CO排放接近于零。

## 参考文献

- [1] 崔玉峰, 徐纲, 聂超群, 等. 数值模拟在合成气燃气轮机燃烧室设计中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 109-116. Cui Yufeng, Xu Gang, Nie Chaoqun, et al. Application of numerical simulation in the design of gas turbine combustor for burning syngas[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 109-116(in Chinese).
- [2] 徐纲, 俞篪, 雷宇, 等. 合成气燃气轮机燃烧室的试验研究[J]. 中

- 国电机工程学报, 2006, 26(17): 100-105.
- Xu Gang, Yu Bin, Lei Yu, et al. Experimental research on gas turbine combustor for burning syngas[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 100-105(in Chinese).
- [3] 张永生, 穆克进, 张哲颠, 等. 不同空气和燃料旋流强度下合成气稀释扩散火焰特性研究[J]. 中国电机工程学报, 未出版  
Zhang Yongsheng, Mu Kejin, Zhang Zhedian, et al. Research on syngas diluted diffuse flame characteristics under different swirling intensity of air and fuel [J]. Proceedings of the CSEE, (in Chinese)
- [4] Takashi T, Shigeru H. The effects of fuel-air mixing on  $\text{NO}_x$  formation in non-premixed swirl burners[C]. Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, Pittsburgh, 1996: 2733-2739.
- [5] Daniel E G, Sibendu S, Suresh K A.  $\text{NO}_x$  emission characteristics of counterflow syngas diffusion flames with air stream dilution[J]. Fuel, 2006, 85(12-13): 1729-1742.
- [6] Chung S H, Williams F A. Asymptotic structure and extinction of  $\text{CO-H}_2$  diffusion flames with reduced kinetic mechanisms [J]. Combustion and Flame, 1990, 82(3-4): 389-410.
- [7] Fotache C G, Yan T, Sung C J, et al. Ignition of  $\text{CO/H}_2/\text{N}_2$  versus heated air in counterflow: experimental and modeling results [J]. Combustion and Flame, 2000, 120(4): 417-426.
- [8] Fric T F. Effects of fuel-air unmixedness on  $\text{NO}_{(x)}$  emissions[C]. 28th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Nashville, TN, 1992.
- [9] Milosavljevic V D, Taylor A M K P, Whitelaw J H. The influence of burner geometry and flow rates on the stability and symmetry of swirl-stabilized nonpremixed flames[J]. Combustion and Flame, 1990, 80(2): 192-208.
- [10] Pitts W M. Assessment of theories for the behavior and blowout of lifted turbulent jet diffusion flames[C]. 22nd Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh, 1988.
- [11] Merkle K, Haessler H, Buchner H, et al. Effect of co- and counter-swirl on the isothermal flow- and mixture-field of an airblast atomizer nozzle[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(4): 529-537.
- [12] Ateshkadi A, McDonell V G, Samuelson G S. Effect of hardware geometry on gas and drop behavior in a radial mixer spray[C]. 27th Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh, 1998.
- [13] Durbin M D, Ballal D R. Studies of lean blowout in a step swirl combustor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1996, 118(1): 72-77.
- [14] 比埃尔 J M, 切给尔 N A. 燃烧空气动力学[M]. 陈熙译. 北京: 科学出版社, 1979: 117-120.
- [15] Drake M C, Blint, Richard J. Relative importance of nitric oxide formation mechanisms in laminar opposed-flow diffusion flames [J]. Combustion and Flame, 1991, 83(1-2): 185-203.
- [16] Vanierschot M, Bulck E V. Hysteresis in flow patterns in annular swirling jets[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 31(6): 513-524.
- [17] 林宇震, 刘高恩, 王华芳. 反向与同向双旋流器流场的试验研究 [J]. 航空动力学报, 1995, 10(4): 423-425.  
Lin Yuzhen, Liu Gaoen, Wang Huafang. Experimental study on the co and counter swirler flow field[J]. Journal of Aerospace Power, 1995, 10(4): 423-425.
- [18] Nathan G J, Mi J, Alwahabi Z T, et al. Impacts of a jet's exit flow pattern on mixing and combustion performance [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(5-6): 496-538.
- [19] 焦树建, 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 231.



张永生

收稿日期: 2008-09-23。

作者简介:

张永生(1976—), 男, 博士后, 现于华北电力大学从事合成气燃烧、燃气轮机相关方面的研究工作, zhangys7876@yahoo.com.cn。

(责任编辑 王庆霞)