

入口流动参数脉动对燃气轮机燃烧室 燃烧不稳定的影响

谢 法¹, 张珊珊², 蒋洪德¹

(1. 清华大学 热能工程系 燃气轮机研究所, 北京 100084;

2. 北京华清燃气轮机与煤气化联合循环工程技术有限公司, 北京 100084)

摘 要: 通过均匀搅拌器(PSR)模型研究了某型燃气轮机燃烧室入口流动参数脉动对燃烧不稳定的影响. 研究表明:对于贫预混燃烧室(燃烧室工作在较低的入口当量比下)来说,当入口温度、入口气体流量和入口当量比的相对脉动幅值相同时,入口当量比的脉动对燃烧不稳定性的影响最大,其次是入口气体流量,而入口温度的脉动对燃烧不稳定性的影响相对较小.

关 键 词: 燃气轮机; 贫预混燃烧室; 均匀搅拌器模型; 燃烧不稳定性; 入口流动参数; 脉动

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Effects of inlet flow parameters oscillation on combustion instability of gas turbine combustor

XIE Fa¹, ZHANG Shan-shan², JIANG Hong-de¹

(1. Gas Turbine Institute,

Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing Huatsing Gas Turbine and Integrated Gasification Combined

Cycle Technology Company Limited, Beijing 100084, China)

Abstract: The effects of inlet flow parameters oscillation on combustion instabilities of a gas turbine combustor were studied by introducing perfectly stirred reactor (PSR) model. The simulation results demonstrate that, for lean premixed combustor (combustor operating at low inlet equivalence ratio), when the relative oscillation amplitudes of inlet temperature, inlet mixture mass flow rate and inlet equivalence ratio are the same, the oscillation of inlet equivalence ratio has the largest effect on combustion instability phenomenon, then followed by inlet mixture mass flow rate, and the inlet temperature yields the lowest effect.

Key words: gas turbine; lean premixed combustor; perfectly stirred reactor model; combustion instability; inlet flow parameters; oscillation

燃烧室作为燃气轮机的三大核心部件之一,肩负着重要的功能.一方面它需要将燃料的化学能有效地释放出来转换为高温高压的燃气,为其在透平中膨胀做功提供条件^[1];另一方面,它还负责控制 NO_x 的生成^[2-3].近年来,随着全世界对环境保护问题的重视,各国对燃气轮机燃烧室(下文简称燃烧室)的排放要求越来越严格,尤其是

NO_x 的排放^[4-6].因此,在设计与开发新一代燃气轮机时,各主要燃气轮机制造商,如 GE(General Electric),MHI(Mitsubishi),Siemens 等,大都采用贫预混燃烧技术,以取代传统的扩散燃烧模式.搭配燃烧室注水或注蒸汽的方法^[7-9].虽然采用贫预混燃烧方式的燃烧室具有低污染的优点,但它的发展受到诸多限制,如熄火^[10-11]、回火^[12],尤其

是燃烧不稳定问题^[13-14]。燃烧不稳定性会引起燃烧室内的热声振荡,热声振荡主要是受到燃烧的热释放率和压力扰动波的来回传递形成共振而产生。当燃烧室内微小的压力扰动波经过火焰区域时,一部分的热能可以被转换为放大压力扰动的动能,如果这些能量无法经由其他的方式耗散掉,便会累积在压力扰动波内而迅速形成驻波,进而与热释放率产生共振^[15]。这种自激发的压力波振荡,不仅干扰正常的燃烧过程,使得 NO_x 的排放达不到最初设计的标准,严重时更会损坏燃烧室的构件,减低燃气轮机的整体寿命。

由于燃烧室内同时存在着流动、化学反应、传热传质等现象,各个过程之间又交互作用,十分复杂。因此,对燃烧不稳定的驱动机理还没有得到很好的理解。此外,Zukoski^[16]的研究表明:燃烧室内火焰区的热释放与化学反应速率成正比,而燃烧过程中的放热脉动会导致燃烧室内高振幅的压力脉动。因此,通过研究燃烧室入口流动参数脉动对化学反应速率的影响即可获得对燃烧室不稳定性的影响。

本文通过研究某型燃烧室入口流动参数对燃烧不稳定的影响,目的是寻找影响燃烧不稳定的关键入口流动参数,为下一步探索有效的燃烧不稳定控制策略打下基础。

1 物理模型和计算方法

从微观层面,通常认为在干式低污染燃烧室内,燃烧化学反应及随之带来的剧烈热释放均发生于火焰锋面处。在火焰锋面的微元内,燃料和氧化剂在分子层面形成完全混合进而发生反应;从宏观层面,燃烧室的主燃烧区内一般发生着剧烈的湍流混合过程,从而使得化学动力学成为制约燃烧过程快慢的控制因素。

基于以上认识,作为定性研究,本文以甲烷为燃料,将燃烧室的燃烧区简化为单个 PSR 模型来研究燃烧室入口流动参数脉动对燃烧稳定性的影响。

1.1 物理模型

本文采用 Chemkin 软件中的 PSR 模型来研究某型燃烧室入口流动参数脉动对燃烧不稳定的影响机制。在 PSR 模型中做了如下假定:① PSR 内以及出口物料的组分和温度等参数均匀一致,且不随时间、空间而变化;② 各物料微元在 PSR 内的停留时间不尽相同,存在差异,如图 1 所示。

质量控制方程^[17]

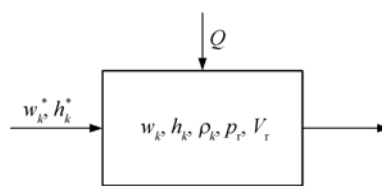


图 1 PSR 模型示意图

Fig. 1 Schematic of PSR model

$$\dot{m}_{in}(\omega_k - \omega_{k,in}) - \nu_k V_r M_k = 0 \quad (1)$$

能量控制方程^[17]

$$\dot{m}_{in} \sum_{k=1}^N (\omega_k h_k - \omega_{k,in} h_{k,in}) + Q = 0 \quad (2)$$

在上述方程中, $\dot{m}_{in}$ 表示入口气体的流量(g/s); ω_k 表示第 k 种反应气体的质量分数; ν_k 表示第 k 种组分的化学反应速率(mol/(cm³·s)); M_k 表示第 k 种组分的摩尔质量(g/mol); V_r 是 PSR 的体积(cm³); h_k 表示第 k 中组分的比焓(J/g); Q 为 PSR 的散热速率(J/s);下标 in 表示入口参数。

停留时间 τ 由 PSR 的体积和反应气体的流量确定,具体的表达式如下:

$$\tau = \frac{\rho_r V_r}{\dot{m}_{in}} \quad (3)$$

其中密度由理想气体状态方程计算获得

$$\rho_r = \frac{p_r \bar{M}_r}{RT_r} \quad (4)$$

上式中 p_r 表示 PSR 内压力; R 是通用气体常数(J/(mol·K)); T_r 表示 PSR 内温度(K); $\bar{M}_r$ 是 PSR 内混合物的平均摩尔质量(g/mol)。

1.2 反应机理

在本次模拟中,采用了甲烷单步反应机理。单步化学反应速率由如下表达式确定^[18]:

$$\omega_{CH_4} = 9.76 \times 10^{14} e^{-\frac{21952.1}{T_r}} c_{CH_4} c_{O_2} \quad (5)$$

式中 c 为浓度。

1.3 PSR 入口流动参数设定

PSR 模型入口流动参数是在参考某型单个燃烧室的入口流动参数后设定的。在模拟中,PSR 模型入口流动参数及 PSR 内参数分别设为: $\dot{m}_{in}=300$ g/s, $T_{in}=465$ K, $p_r=1\,736\,000$ Pa, $V_r=10$ cm³, PSR 内的初始温度预设 2000 K,入口当量比 ϕ_{in} 在 1.0~0.73 之间线性减小^[19],其中上标“—”表示参数的平均量。入口当量比随时间 t 的变化关系参考文献[20],具体表达式如下:

$$\phi_{in} = 1.0385 - 0.771 t \quad 0.05 \leq t \leq 0.4 \quad (6)$$

为了研究燃烧室入口流动参数的脉动对燃烧不稳定性的影响,在本研究中,将燃烧室入口流动参数统一赋予脉动相对幅值 $\varepsilon_T = \varepsilon_m = \varepsilon_\phi = 0.3$,脉动频率 $f = 100 \text{ Hz}$ 的脉动量,具体如式(7)~式(9)所示.当研究某一入口流动参数对燃烧不稳定性的影响时,其他入口流动参数的脉动相对幅值取零,也即其他入口流动参数取平均值.

$$T_{in} = \bar{T}_{in} [1 + \varepsilon_T \cos(2\pi ft)] \quad (7)$$

$$\dot{m}_{in} = \bar{\dot{m}}_{in} [1 + \varepsilon_m \cos(2\pi ft)] \quad (8)$$

$$\phi_{in} = \bar{\phi}_{in} [1 + \varepsilon_\phi \cos(2\pi ft)] \quad (9)$$

2 计算结果与讨论

2.1 入口温度脉动的影响

图2显示了燃烧室入口温度脉动对化学反应速率的影响.从图中可以看出:当入口温度发生脉动时,化学反应速率也会发生脉动.此外,随着入口当量比的逐渐减小,化学反应速率的脉动幅值也逐渐减小,也即燃烧室的放热脉动幅值逐渐减小.这表明:当入口当量比接近于化学恰当比(等于1)时,燃烧室入口温度脉动对燃烧不稳定的影响较大,而当入口当量比较小时,燃烧室入口温度脉动对燃烧不稳定的影响较小,也即对于贫预混燃烧室来说,燃烧室入口温度脉动对燃烧不稳定性影响较小.

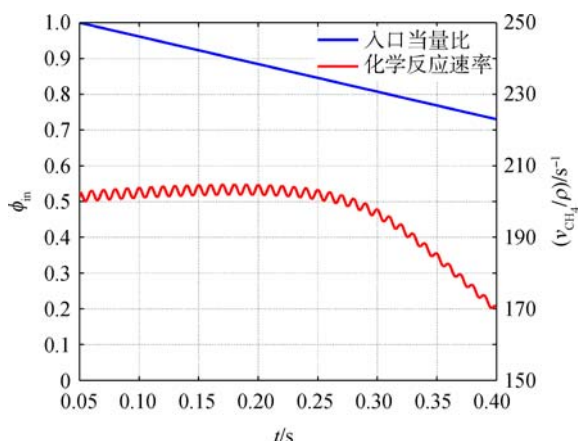


图2 燃烧室入口温度脉动对化学反应速率的影响

Fig. 2 Effect of inlet temperature oscillation of combustor on reaction rate

出现上述变化的原因是:当燃烧室入口温度发生脉动时,根据理想气体状态方程可知:在等压燃烧情况下,进入PSR的氧化剂的浓度也发生变化,从而导致化学反应速率发生变化.另外,在式(5)中的阿累尼乌斯因子 $e^{-\frac{21952}{T_r}}$ 会随PSR内温度

T_r 的增加而增加,也即化学反应速率会随火焰温度的增加而增加.而火焰温度是随入口当量比的增加而增加.因此,当燃烧室入口温度发生脉动时,随着入口当量比的减小,化学反应速率的脉动幅值也将逐渐减小.

2.2 入口气体流量脉动的影响

图3显示了燃烧室入口气体流量脉动对化学反应速率的影响.从图中可以看出:当入口气体流量发生脉动时,化学反应速率也会发生的脉动;随着入口当量比的逐渐减小,化学反应速率的脉动幅值基本没有太大的变化.

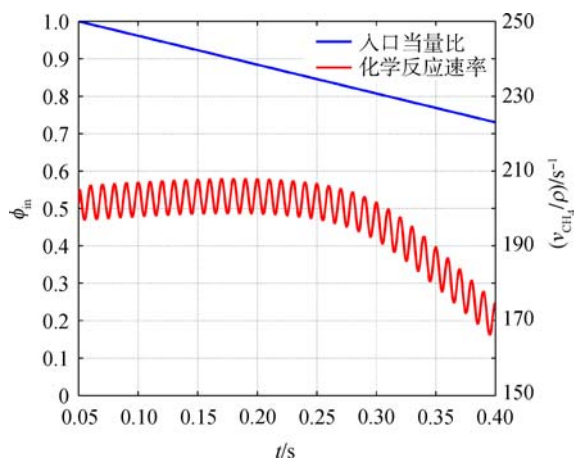


图3 燃烧室入口气体流量脉动对化学反应速率的影响

Fig. 3 Effect of inlet mixture mass flow rate oscillation of combustor on reaction rate

究其原因是,根据表达式(3)可知:燃烧室入口气体流量脉动只会影响进入PSR的燃料/空气混合物的停留时间,而对化学反应速率的影响很小.因此,当燃烧室入口气体流量发生脉动时,化学反应速率的脉动幅值几乎没有变化.

2.3 入口当量比脉动的影响

图4显示了燃烧室入口当量比脉动对化学反应速率的影响.从图中可以看出:当入口当量比发生脉动时,化学反应速率也会发生脉动;当入口当量比从1.0到0.85逐渐减小时,化学反应速率的脉动量很小,几乎可以忽略.而当入口当量比从0.85进一步减小时,化学反应速率的脉动幅值会随入口当量比的脉动发生急剧的增加.这说明:当燃烧室工作在较低的当量比下工作时,微小的入口当量比脉动也会使化学反应速率发生较大幅值的脉动,也即微小的入口当量比脉动会引起燃烧室内的较大幅值的放热脉动.

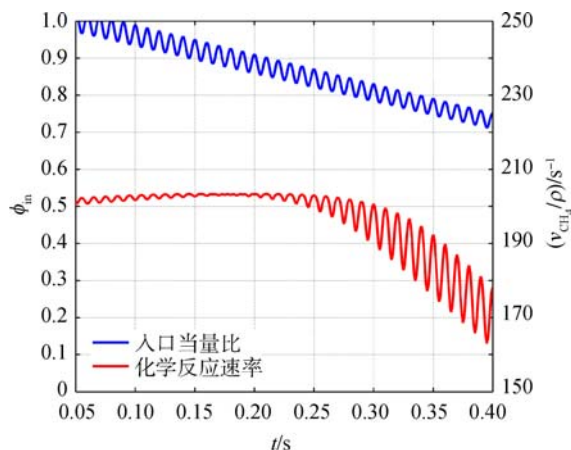


图4 燃烧室入口当量比脉动对化学反应速率的影响

Fig. 4 Effect of inlet equivalence ratio oscillation of combustor on reaction rate

出现上述结果的可能原因是:当进入 PSR 的当量比在某一定常数下发生变化时,PSR 内的火焰温度也发生变化,根据式(5)可知:化学反应速率也将发生变化.另外,当进入 PSR 的反应物当量比在化学恰当比附近变化时,PSR 内的火焰温度变化不大,因此此时 PSR 入口当量比的脉动对化学反应速率的影响不大;而当 PSR 入口当量比在较低的范围变化时,PSR 内火焰温度变化剧烈,也即化学反应速率变化剧烈.因此,在入口当量比较低的情况下,入口当量比发生一个小的脉动量都会引起化学反应速率脉动幅值的剧烈变化.

2.4 各入口流动参数脉动的影响比较

图5示出了燃烧室各入口流动参数发生相同脉动对化学反应速率量纲一脉动幅值的影响.通过计算得知:当燃烧室入口当量比接近于化学恰当比为1时,入口气体流量脉动对化学反应速率的影响最大,是诱导燃烧不稳定的主要因素,此时入口当量比、入口气体流量和入口温度脉动引起化学反应速率的相对脉动量分别为0.01%、2.6%和1%.而当燃烧室入口混合物的当量比接近于0.73时,也即对于贫预混燃烧室来说,当入口温度、气体流量和当量比的相对脉动幅值相同时,入口当量比脉动对化学反应速率的影响最大,是诱导燃烧不稳定的最主要因素,此时入口当量比、气体流量和温度脉动引起化学反应速率的相对脉动量分别为4.6%、2.7%和0.76%.

在入口当量比从1.0减小到0.73的过程中,入口当量比脉动引起的化学反应速率脉动幅值变化最剧烈,从0.01%变化到4.6%,变化了接近460倍;入口温度脉动引起的化学反应速率脉动

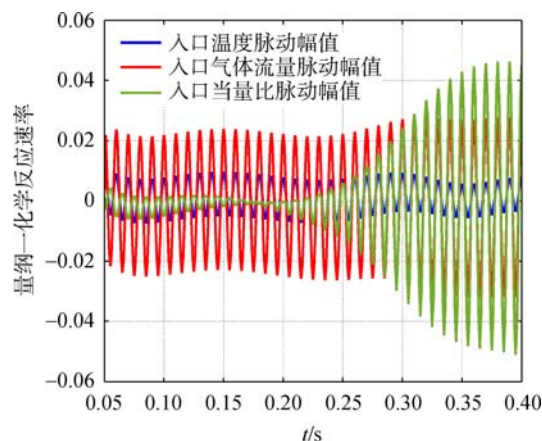


图5 各入口流动参数脉动对化学反应速率的影响比较

Fig. 5 Comparison of effect of inlet flow parameters oscillation on reaction rate

幅值变化不大,入口气体流量脉动引起对化学反应速率脉动幅值几乎没有影响.

出现上述结果的可能原因是:当入口当量比接近于化学恰当比时,入口当量比的脉动对火焰温度影响很小,所以对化学反应的影响也很小;而当入口当量比较低时,入口当量比脉动对火焰温度的影响很大,进而引起化学反应速率的剧烈变化.

3 结 论

本文通过数值方法研究了入口流动参数脉动对某型燃烧室燃烧不稳定性的影响.具体的研究结论如下:

- 1) 当入口流动参数(温度、流量、当量比)发生脉动时,化学反应速率也会发生脉动.
- 2) 当入口温度发生脉动时,随着入口当量比的减小,化学反应速率的脉动幅值也减小;当入口气体流量发生脉动时,随着入口当量比的逐渐减小,化学反应速率的脉动幅值基本没有太大的变化;当入口当量比发生脉动时,当入口当量比在化学恰当比附近变化时,化学反应速率的脉动幅值几乎没有变化;当入口当量比在较低的范围变化时,化学反应速率的脉动幅值会随入口当量比的脉动发生急剧的增加.
- 3) 对于贫预混燃烧室,当入口温度、气体流量和当量比的相对脉动幅值相同时,入口当量比的脉动对燃烧不稳定性的影响最大,是诱发燃烧不稳定的主要因素.

参考文献:

- [1] Lefebvre A H. Gas turbine combustion[M]. Philadelphia,

- US: Taylor and Francis, 1999.
- [2] 焦树建. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [3] Mellor A M. Design of modern turbine combustors[M]. New York: Academic Press, 1990.
- [4] Imamura A, Yoshida M. Research and development of a LPP combustor with swirling flow for low NO_x [R]. AIAA-2001-3311, 2001.
- [5] Marek C J, Smith T D. Low emission hydrogen combustors for gas turbines using lean direct injection [R]. AIAA-2005-3776, 2005.
- [6] Robert T, Mao C P, Changlie W. Experimental investigation of a multiplex fuel injector module for low emission combustors[R]. AIAA-2003-0827, 2003.
- [7] Davis L B, Black S H. Dry low NO_x combustion systems for GE heavy-duty gas turbines[R]. New York: GE Power Systems GER-3568G, 1996.
- [8] Tanaka K, Nishida K, Akizuki W. Gas turbine combustor technology contributing to environmental conservation[J]. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2009, 46 (2): 6-12.
- [9] 赵巍. 燃气轮机干式低污染燃烧室的设计研究[D]. 上海: 上海发电设备成套设计研究所, 2003.
- ZHAO Wei. Investigation of dry low emission gas turbine combustion chamber [D]. Shanghai: Shanghai Power Equipment Research Institute, 2003. (in Chinese)
- [10] XIE Fa, HUANG Yong, HU Bin, et al. Improved semiempirical correlation to predict lean blowout limits for gas turbine combustors[J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 28(1): 197-203.
- [11] 谢法, 黄勇, 苗辉, 等. 气量分配对轴径向旋流器燃烧室贫燃边界的影响[J]. 航空动力学报, 2011, 26(8): 1756-1760.
- XIE Fa, HUANG Yong, MIAO Hui, et al. Effects of air-flow split and primary holes arrangement on the lean blowout limits of a combustor with axial-radial swirl cup [J]. Journal of Aerospace, 2011, 26 (8): 1756-1760. (in Chinese)
- [12] Abdulsada M. Flashback and blowoff characteristics of gas turbine swirl combustor [D]. Cardiff, UK: Cardiff University, 2011.
- [13] 房爱兵. 燃气轮机合成气燃烧室燃烧稳定性的实验研究 [D]. 北京: 中国科学院, 2007.
- FANG Aibing. Investigation of combustion instability in syngas combustor of gas turbine [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)
- [14] 郭志辉, 王帅, 李磊, 等. 贫燃预混旋流火焰燃烧不稳定性的实验[J]. 航空动力学报, 2009, 24(12): 2637-2642.
- GUO Zhihui, WANG Shuai, LI Lei, et al. Experimental study on combustion instability of lean premixed swirl flame [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24 (12): 2637-2642. (in Chinese)
- [15] Lee H J. Combustion instability mechanisms in a lean premixed gas turbine combustor [D]. Philadelphia, US: Pennsylvania State University, 2009.
- [16] Zukoski E E. Afterburners[M]//Oates G C. Aerothermodynamics of aircraft engine components. New York: AIAA, 1985: 45-144.
- [17] 云竹士. Chemkin 基础培训资料 [EB/OL]. [2013-01-07]. <http://wenku.baidu.com/view/66af971f5f0e7cd1842536c2.html>.
- [18] 李卓毅, 张会强. 甲烷-一维层流预混火焰的详细和单步反应机理模拟[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45 (11): 1510-1512, 1517.
- LI Zhuoyi, ZHANG Huiqiang. Numerical simulations of one-dimensional laminar premixed CH₄/air flames using the detailed and one-step reaction mechanisms[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005, 45 (11): 1510-1512, 1517. (in Chinese)
- [19] Lieuwen T C, Neumeier Y, Zinn B T. The role of unmixedness and chemical kinetics in driving combustion instabilities in lean premixed combustors[J]. Combustion Science and Technology, 1998, 135(1): 193-211.
- [20] Lieuwen T C. Investigation of combustion instability mechanisms in premixed gas turbine combustors [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1999.

(编辑: 陈越)