

文章编号: 1000-8055 (2009) 12-2637-06

贫燃预混旋流火焰燃烧不稳定性的实验

郭志辉, 王 帅, 李 磊, 张澄宇, 孙晓峰
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院
航空发动机气动热力科技重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 实验研究了常温常压条件下贫燃预混旋流火焰的燃烧不稳定性. 结果表明: 不稳定燃烧时, 火焰结构发生显著变化, 呈现大尺度运动的特点. 燃烧室所发生的燃烧不稳定性是纵向自激式振荡, 是燃烧室与预混段之间的耦合, 振荡频率由整个系统决定. 随着当量比的提高, 燃烧经历了由稳定到不稳定, 并达到有限循环脉动的过程. 流动脉动和火焰的相互作用, 是激发和维持振荡的主要原因, 需要深入研究不稳定燃烧性产生和得以维持的机理.

关 键 词: 燃烧不稳定性; 贫油预混火焰; 旋流

中图分类号: V231. 3

文献标识码: A

Experimental study on combustion instability of lean premixed swirl flame

GUO Zhi-hui, WANG Shuai, LI Lei, ZHANG Cheng-yu, SUN Xiao-feng
(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engines,
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100191, China)

Abstract: An experimental study was conducted on combustion instabilities in a lean premixed swirl-stabilized combustor at atmospheric pressure and temperature. The result shows that the combustion instability occurred in the model combustor is self-excited under longitudinal oscillation mode, the premixing section resonates with the combustor at the unstable mode of the system, and the oscillation frequency depends on the whole system. The equivalence ratio was identified to have major impact on the onset of instabilities. With equivalence ratio increase, the combustion was transited from stable to unstable states, and reached a limit cycle at last. In the occurrence of instability, the flame became much shorter and penetrated into the corner recirculation. The instability mechanism probably stems from the strong interaction between flame dynamics and flow oscillations inside the combustor, but more work is needed to provide an in-depth physical understanding of the mechanisms to initiate and sustain combustion instabilities.

Key words: combustion instabilities; lean premixed flame; swirl flow

随着人们环保意识的日益增强, 控制燃气轮机的污染排放已成为国内外研究的重要课题. 贫油预混燃烧可以有效地降低氮氧化物以及一氧化

碳的排放, 已广泛应用于燃气轮机的设计^[1]. 但是, 由于用预混燃烧取代传统的扩散燃烧; 而且运行工况接近贫油极限; 同时大量空气通过火焰头

收稿日期: 2008-12-01; 修订日期: 2009-02-26

基金项目: 国防基础科研项目 (K12300060702)

作者简介: 郭志辉 (1969 -), 男, 黑龙江望奎人, 副教授, 硕士, 主要从事夜雾燃烧研究.

部进入,减小或取消火焰筒的大孔进气,火焰筒的声学阻尼作用显著减小,因而容易发生不稳定燃烧现象.这种现象可导致燃烧室乃至整个发动机振动加剧,发出巨大的噪声,热负荷增高,从而影响发动机的性能,严重时使发动机部件遭到破坏和烧灼,而且加剧污染物的产生.

Schadow 等人提出燃烧不稳定性产生和维持的机理是流体动力不稳定性与当量比的脉动^[2]. Lieuwen 认为贫燃预混突扩燃烧室内的非稳态燃烧脉动,是由燃油喷嘴附近速度脉动产生的当量比脉动引起的,研究证实了燃烧不稳定性反馈循环过程中当量比脉动的重要作用^[3]. LEE S Y, Meier W 先后采用平面激光诱导荧光(PLIF, planar laser induced fluorescence)方法研究发生不稳定燃烧情况下,高湍流贫油预混火焰的平均反应速率和火焰结构的时域变化^[4,5]. Huang Ying 和 Yang V 等人利用大涡模拟研究燃烧过程中的涡脱落现象,分析了稳态与非稳态燃烧的分叉机理^[6]. 张欣刚等通过计算流体动力学(CFD)模拟 Krueger 等人的实验研究,着重对自激振动的频率和火焰动态特性进行了分析^[7].

本文研究了模型燃烧室贫燃预混旋流火焰燃烧不稳定性的特性,研究了当量比的影响,为深入研究燃烧不稳定性的产生机理和实施控制提供依据.

1 实验设备和研究方法

1.1 实验台结构及实验件

实验台主要由空气供给系统、燃气供给系统、预混段、燃烧室以及数据测量系统组成,如图1所示.预混段为内径80 mm的管路,长度为1500 mm,燃烧段为80 mm×80 mm的方形燃烧室,长度为540 mm.混气喷嘴是环形,中间钝体为30 mm,喷嘴外径40 mm,轴向旋流器距离喷嘴25 mm,旋流数0.83.

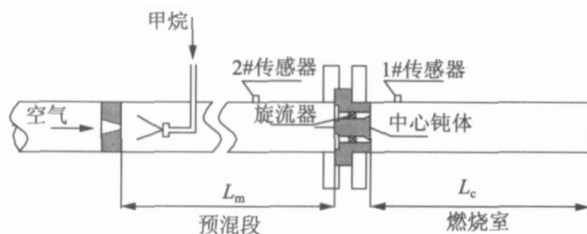


图1 实验段结构示意图

Fig. 1 Sketch of experiment equipments

实验所用空气采用低压气源供气,气源压力

为0.6 MPa,空气经减压阀和涡轮流量计后,通过一直径为7 mm的声速喷嘴进入预混段,声速喷嘴确定预混段上游的全反射边界条件.燃料采用瓶装甲烷,纯度为99.9%.甲烷由离心喷嘴逆向喷射,流量由气体质量流量计测量.

实验中,空气流量为16 g/s,甲烷预混气的当量比为0.55~0.9.

1.2 动态压力测量

动态压力的测量选用集成水冷动态压力传感器(PCB 124A21),1#压力传感器位于燃烧室下游120 mm处;2#压力传感器位于混合段,距离混气喷嘴360 mm处.动态压力测量的采样频率是4000 Hz,每个实验状态采集8192个数据,并重复采集3次.

2 实验结果与分析

2.1 不稳定燃烧火焰图像的描述和分析

随着当量比的增加,燃烧由稳定状态过渡到不稳定状态,可以观察到火焰形状和位置的变化.图2为数码相机直接拍摄到的当量比不同时,稳定燃烧与不稳定燃烧时火焰图像,能从宏观上看到火焰的结构和运动过程.

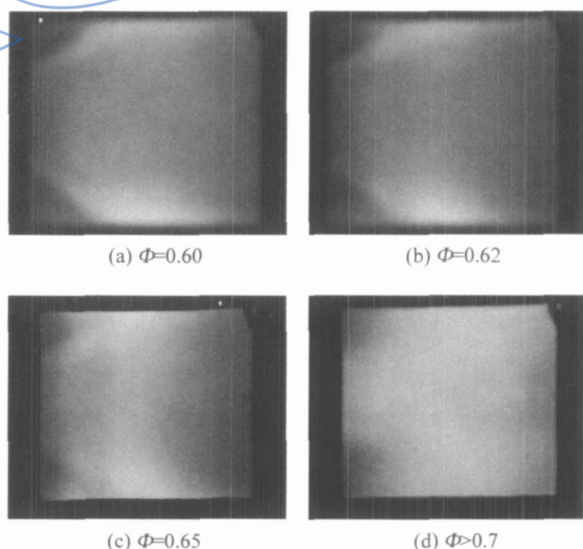


图2 不同当量比时火焰图像

Fig. 2 Flame images at different equivalence ratios

当量比较低(小于0.60)时,火焰并没有附着在中心钝体后,也没有稳定在回流区附近,而是稳定在大约60 mm处.虽然整个火焰前后摆动,但脉动压力很小,燃烧是稳定的.当量比 $\Phi=0.60$ 时,图2(a)所示,火焰稳定在中心钝体后,火焰面平滑,呈火焰封闭楔形,火焰在突扩面下游20 mm

左右处附在燃烧室壁面上,此时火焰面较平滑,可看到清晰的中心回流区和突扩面处的角回流区,火焰在轴向和径向上脉动很小,此时燃烧是稳定的。

当 Φ 达到 0.62 以后,火焰前后摆动,发生间歇振荡。当 Φ 达到 0.65 时,在燃烧室壁面处火焰不断回火到突扩面处。随着当量比的进一步提高,燃烧由稳定过渡到不稳定,火焰呈现大尺度运动,沿轴向和径向摆动。中心回流区模糊不清,角涡内逐渐充满脉动火焰。当量比大于 0.7 以后,直接观察时,火焰处于紊乱的“相对稳定状态”,显然,相当于燃烧室内脉动压力已达到有限循环状态。

对于预混火焰,激发燃烧不稳定性的机理通常分为 3 个方面^[1,3],即:与混气形成有关的油气当量比脉动,流体动力不稳定性即漩涡脱落,以及火焰面的脉动,而后面两个机理通常耦合在一起。对于所研究的结构,空气经预混段进口的声速喷口喷入,压力达到临界状态,空气的流量是稳定的,因此燃料流量本身并不脉动,而且预混段内压力脉动的幅值远低于燃烧室内压力脉动的幅值,可以排除当量比脉动产生燃烧不稳定性的机理。因此,后面两个机理可能是主要原因。对于预混旋流火焰,LEE S Y 也认为,火焰动力学和流动脉动间的强烈相互作用是可能的机理^[4]。

由于燃烧室头部结构由中心钝体、旋流和突扩面组成,因此形成的流场结构非常复杂。图 3 是利用 FLUENT 程序计算得到的稳态燃烧时的流线和温度等值线的分布。从图中可以看到,可燃混气以环形旋转射流形式进入燃烧室,所形成的流场的典型特征存在中心回流区和角回流区,前者是中心钝体和旋流共同作用的结果,而后者是由于突扩面处的流动扩张形成的。两个回流区起着稳定火焰的作用,并决定火焰的结构形状,两者分别位于混气射流的两侧,并且和环形射流形成内外两个剪切层。在稳态流动情况下,中心回流区和角回流区的尺度,完全取决于旋流强度、燃烧室的结构和当量比。

当燃烧不稳定性发生时,在燃烧室壁面处,出现回火现象,引起角涡内温度升高,体积增大,压缩火焰面向内运动,回流区内温度进一步升高,火焰缩短并前后摆动,回流区的形状和位置呈周期性变化,火焰有时完全附着在燃烧室突扩面上。声波从燃烧获得的能量大于声能量的损失,满足瑞利准则,激发了燃烧室的本征模式,完成了燃烧从稳定到不稳定的过渡。当达到能量平衡时,不稳定

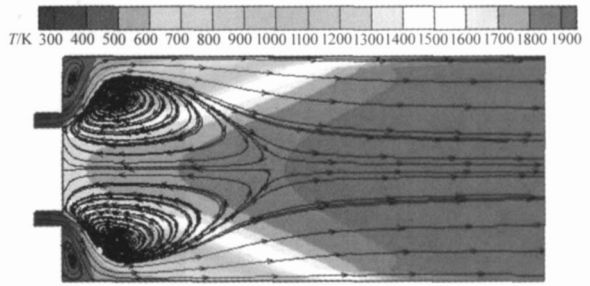


图 3 稳态火焰的流线和温度等值线分布

Fig. 3 Numerical calculations of streamlines and temperature contours of a stable flame at $\Phi=0.60$

性的强度不再增大,即达到有限循环状态。Huang Ying 和 Yang V 利用大涡模拟进行了详细研究,认为是火焰分叉现象是燃烧从稳定到不稳定的过渡的原因^[6]。

2.2 模态结构特点

研究燃烧不稳定性的目的是为了实施控制,因此,首先需要确定模态结构。本文所研究的模型燃烧室,纵向尺度远大于横向尺度,发生的燃烧不稳定性是纵向模式。图 4 是在 $\Phi=0.75$ 时,测得不同轴向位置的脉动压力幅值。可见,对于确定的工况参数,在预混段和燃烧室内形成驻波。预混段进口和燃烧室进口处压力脉动最大,是波腹位置,燃烧室出口是波节位置。图 5 是预混段和燃烧室测点处动态压力时间序列图。可见,燃烧不稳定性发生时,燃烧室和预混段的压力脉动都是较规则的波形。预混段内压力脉动相位落后于燃烧室,显然,这是由燃烧室的振荡诱发的,而且两者发生共振现象。

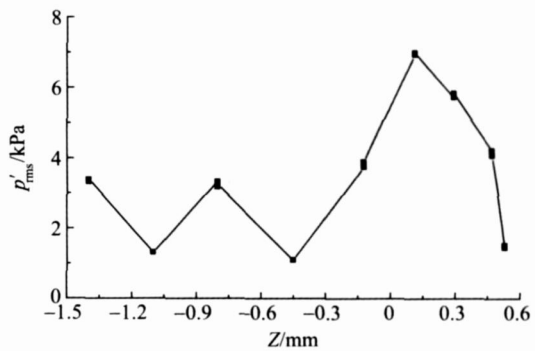


图 4 不同轴向位置测得的脉动压力幅值分布

Fig. 4 Amplitude of dynamic pressure at different axial positions

图 6 是燃烧室和预混段测点动态压力的频谱分布。可见,燃烧室压力脉动的主频为 253 Hz,预混段除了此主频外,还激发了二次谐波,但在所测

点处,其幅值只有燃烧室幅值的 15 %.

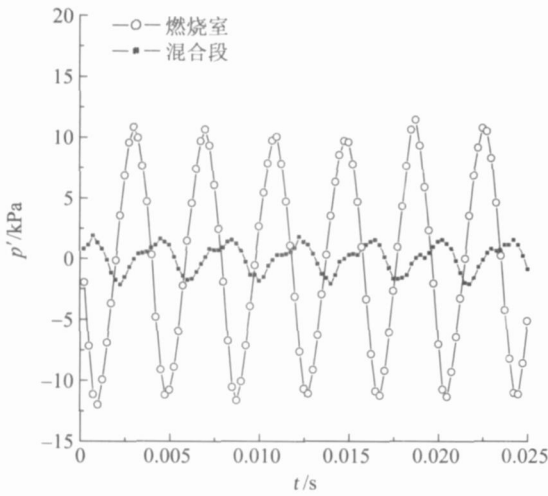


图 5 燃烧室和预混段测点处动态压力时间序列图
Fig. 5 Part of dynamic pressure in time domain in combustor and premixed sector

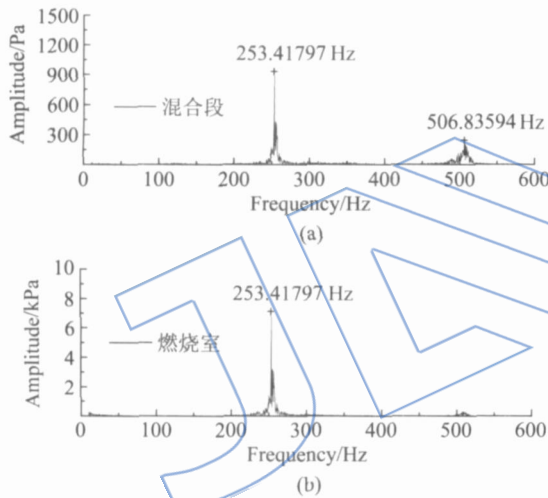


图 6 预混段和燃烧室脉动压力的频谱分析
Fig. 6 Frequency spectrum of dynamic pressures in combustor and premixed sector

对于所激发的不稳定频率,取决于燃烧室系统的结构.图 1 所示的模型燃烧室包括预混段和燃烧室以及旋流器与喷嘴部分,旋流器与喷嘴部分的长度只有 80 mm,而横截面积是预混段的面积 12.5 %,是燃烧室横截面积的 10 %,那么对于预混段和燃烧室来说,可以近似看成“硬壁面”,两者通过旋流器与喷嘴部分相互耦合,显然,共振的频率由两者决定,该频率介于预混段内是一阶波的二次谐波和燃烧室内 1/4 波之间.在后续的研究中将有详细的计算.

2.3 当量比的影响

燃烧不稳定性,主要由燃烧室的结构和工况

参数决定^[1].参数方面影响最大的是速度、温度、当量比、燃料成分等,温度是影响振荡的重要因素^[4,7].由于实验条件所限,本文只研究燃气当量比的影响.

当量比是燃烧室的关键工作参数,决定了燃烧室的最高平均温度,也决定污染物的生成量^[1].对于低污染燃烧室,为了控制燃烧区的温度,通常采取贫燃预混,将当量比控制在贫燃边界附近,通常为 0.4~0.7^[1-3].本文的实验中,由于来流温度是常温,所研究的当量比范围比较宽,为 0.55~0.9.

图 7 是预混段和燃烧室压力脉动幅值与频率随当量比的变化情况.可见,当量比是影响脉动强弱的重要因素,随着当量比的提高,压力脉动迅速增大,最终达到有限振幅状态.当量比达到 0.60 以后,燃烧室和预混段的脉动主频相同,随着当量比的提高,均略有增加.

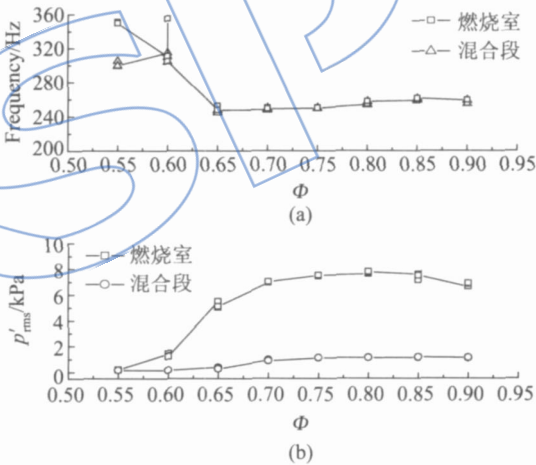


图 7 当量比对压力脉动幅值和频率的影响
Fig. 7 Effects of Φ on oscillation pressure amplitude and frequency

图 8 和图 9 分别是当量比为 0.62,0.65,0.70 和 0.80 等几个典型状态,燃烧室和预混段脉动压力的频谱分析结果.

当量比较低时,燃烧是稳定的,脉动压力很小,而且没有明显的主频率.当 Φ 在大约 0.62 时,发生间歇振荡,瞬间脉动压力幅值达到 8000 Pa,图 10 是动态压力的时间序列.

当 Φ 达到 0.65 时,燃烧完全达到不稳定状态,燃烧室脉动压力接近正弦波,幅值达到 5000 Pa.而预混段的脉动压力则相对较小.而此状态下,振荡频率却相对复杂,在燃烧室激发的主频是 249 Hz,另外来两个幅值很低的频率是 289 Hz 和 214 Hz.而预混段振荡模态却相对复杂,除了激发与燃烧室相同的不稳定模态外,还激发

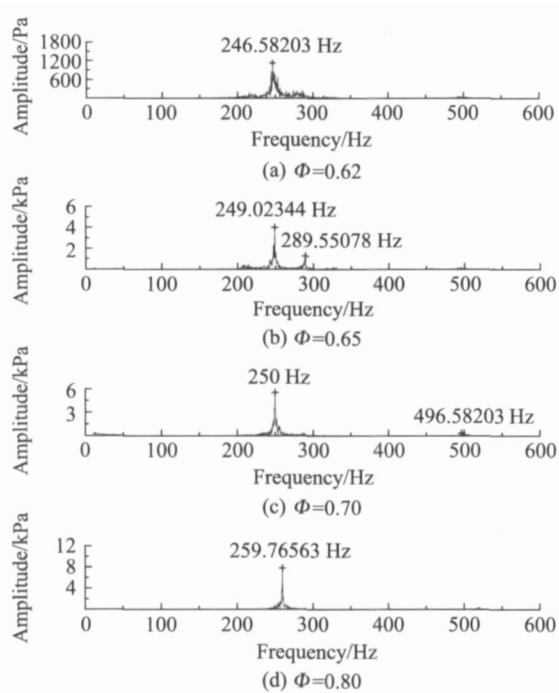


图 8 当量比不同时燃烧室内脉动压力的频谱分析
Fig. 8 Frequency spectrum of dynamic pressures in combustor at different Φ

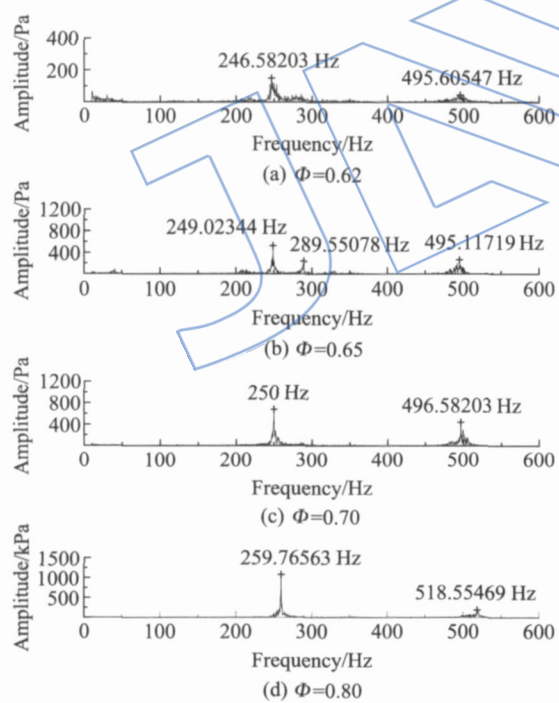


图 9 当量比不同时预混段内脉动压力的频谱分析
Fig. 9 Frequency spectrum of dynamic pressures in premixing section at different Φ

了振幅最大模态的二阶谐波.当 Φ 大于 0.70 后,燃烧不稳定性达到最大状态,燃烧室压力脉动的幅值达到 7500 Pa,而燃烧室和预混段的振荡主频率为 250 Hz 左右,预混段则激发了二阶谐波.其

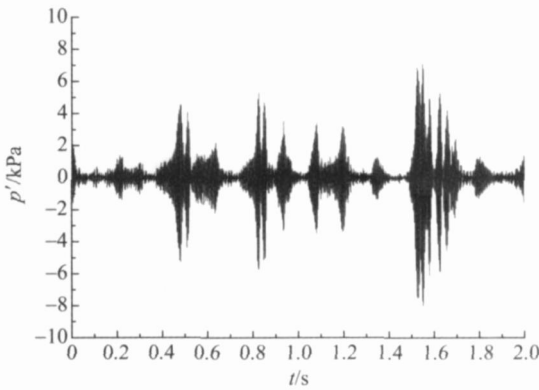


图 10 $\Phi=0.62$ 脉动压力的时间序列
Fig. 10 Time series of dynamic pressure at $\Phi=0.62$

后, Φ 继续增大时,振荡的模式不变,幅值略微增大,可以认为振荡达到有限循环状态.

对于有限循环状态,通常的判断标准是脉动压力幅值不再增加,即在燃烧室结构和参数确定的情况下,所能激发的是最不稳定的状态.图 11 是不同当量比时,燃烧室内脉动压力的统计直方图.可以看出,随着当量比的提高,动态压力的统计分布经历了从单峰到双峰的发展演化过程.因此,直方图分布可以判断出燃烧由稳定到不稳定,最后达到有限循环的过程中各阶段的演变过程,而这单纯从脉动压力的时序和频谱分析无法判断出.

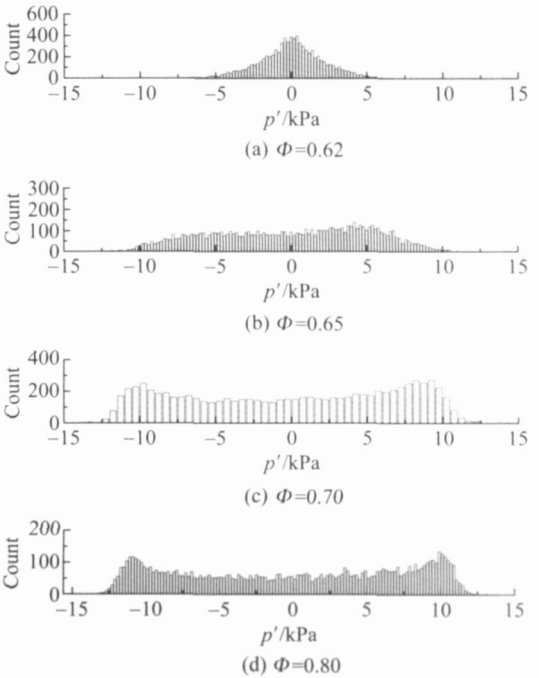


图 11 不同当量比时燃烧室内脉动压力的直方图
Fig. 11 Histograms of dynamic pressures in combustor at different Φ

由以上分析可知,随着当量比的提高,燃烧经历了从稳定到不稳定燃烧的发展过程,可见当量比是影响燃烧稳定性的重要因素。

在低当量比时,虽然能够燃烧,但火焰温度也较低,同样火焰传播速度较小,而且回流的已燃气不足以提供稳定的点火源。由于以上两个原因,火焰无法稳定在中心钝体后。随着当量比的提高,火焰稳定的条件有所改善,使得火焰能够稳定在钝体后,并形成规则的形状。但随着当量比的进一步提高,燃烧区的温度升高,回流已燃气的温度升高,火焰传播速度提高,把火焰面推向突扩面方向;而在燃烧室壁面处,由于局部气流速度小,火焰向上游传播,出现火焰回火的现象。当量比增大,燃烧区的火焰温度提高,火焰的传播速度增大,火焰缩短,趋向于激发燃烧室的固有声学模式。当量比的进一步增加,压力波从燃烧获得能量与声能损失达到平衡时,达到有限循环状态,脉动压力的幅值不再增大,不稳定燃烧达到一个“相对稳定”的状态。

3 结 论

本文研究了模型燃烧室贫燃预混火焰的燃烧不稳定性,得到以下结论:

1) 模型燃烧室发生的燃烧不稳定性是纵向自激式振荡,振荡模式是燃烧室与预混段之间的耦合的共振现象,振荡频率由整个系统决定,预混段的振荡是由燃烧室引起的受迫振荡。

2) 当量比对燃烧的稳定性具有重要影响,随着当量比的提高,燃烧经历了稳定-间歇脉动-不稳定,并达到有限循环脉动的过程。稳定时,火焰面较平滑;不稳定时,火焰结构显著变化,火焰充满整个燃烧室头部,并作大尺度运动。

3) 随着当量比的提高,振荡的频率变化不大,而脉动压力幅值显著增大,最终达到有限循环状态,从脉动压力的直方图分布可以揭示燃烧不

稳定性的发展过程。

4) 在发生不稳定燃烧时,中心回流区和角回流区在空间和时间上脉动,形成强湍流和温度脉动区域,该区域火焰大尺度脉动,是维持振荡的重要原因。

参考文献:

- [1] Candel S. Combustion dynamics and control: progress and challenges [C]// Proceedings of the Combustion Institute. Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 2002, 29(1): 1-28.
- [2] Schadow K C, Gutmark E. Combustion instability related to vortex shedding in dump combustors and their passive control[J]. Progress of Energy and Combustion Science, 1992, 8:117-132.
- [3] Lieuwen T, Torres H, Johnson C, et al. A mechanism of combustion instability in lean-premixed gas turbine combustor[J]. Journal of Engineering for Gas and Turbine and Power, 2001, 123:182-189.
- [4] Lee S Y, Seo S, Broda J C, et al. An experimental estimation of mean reaction rate and flame structure during combustion instability in a lean premixed gas turbine combustor [C]// Proceedings of the Combustion Institute. Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 2000, 28(1): 775-782.
- [5] Meier W, Weigand P, Duan X R, et al. Detailed characterization of the dynamics of thermoacoustic pulsations in a lean premixed swirl flame[J]. Combustion and Flame, 2007, 150(1-2): 2-26.
- [6] Huang Ying, Yang V. Bifurcation of flame structure in a lean-premixed swirl-stabilized combustor: transition from stable to unstable flame[J]. Combustion and Flame, 2004, 136:383-389.
- [7] 张欣刚,任静,徐治皋. 湍流预混燃烧器燃烧自激振动的数值研究[J]. 燃气轮机技术, 2007, 20(3): 23-28.
ZHANG Xingang, REN Jing, XU Zhigao. Numerical investigation of self-excited oscillation of turbulent premixed combustion[J]. Gas Turbine Technology, 2007, 20(3): 23-28. (in Chinese)