

# 化学当量比对旋流燃烧器热声不稳定特性的影响

李国能, 周昊, 李时宇, 岑可法

(能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学), 浙江省 杭州市 310027)

## Influence of Equivalence Ratio on Characteristics of Thermoacoustic Instability in a Swirl Combustor

LI Guo-neng, ZHOU Hao, LI Shi-yu, CEN Ke-fa

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization (Zhejiang University), Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

**ABSTRACT:** In order to probe into the excitation mechanism of thermoacoustic instability in swirl combustors, an experimental setup has been built including an adjustable swirl combustor. The swirl combustor includes a fuel nozzle, a straight secondary air orifice, three tangential swirl secondary flow pipes and a high momentum tertiary air jet. The ratio of fuel nozzle diameter to that of combustion chamber is 0.25. The temperature distribution inside the combustion chamber and the fluctuating pressure were measured. The influence of equivalence ratio on characteristics of thermoacoustic oscillations was studied. Experimental results show that the maximum oscillating pressure amplitude is larger than 450 Pa, and that the pressure amplitude decreases with the equivalence ratio. The first order resonant frequency lies between 187 Hz and 261 Hz. As the equivalence ratio increases, the first order resonant frequency decreases firstly and following a sharp jump to a much higher value. At last, it increases slightly with the equivalence ratio. The third order resonant frequency lies between 717 and 805 Hz, and the fifth order one lies between 1 178 and 1 326 Hz, both of which increase slightly with the equivalence ratio. The flame front inside the combustion chamber moves downstream when the equivalence ratio increases. The maximum temperature reaches 1 450 K.

**KEY WORDS:** swirl combustor; thermoacoustic instability; equivalence ratio; spectrum analysis

**摘要:** 为探索旋流燃烧器内热声不稳定的产生机理, 搭建了可调型旋流燃烧器热声不稳定试验台架。旋流燃烧器采用燃料风、直流二次风、旋流二次风和高动量三次风的配风结构, 燃料风管直径与燃烧腔直径比为 0.25。试验测量了旋流燃烧器的温度分布和脉动压力, 发现旋流燃烧器热声不稳定的脉

动压力可达 450 Pa, 压力幅值随着化学当量比的增大而减小; 第 1 阶共振频率介于 187~261 Hz 之间, 随着化学当量比的增大先是减小, 随后有一跃升过程, 跃升之后随着化学当量比的增大而缓慢增大; 第 3 阶共振频率介于 717~805 Hz 之间; 第 5 阶共振频率介于 1 178~1 326 Hz 之间, 第 3 阶和第 5 阶共振频率随着化学当量比的增大而缓慢增大; 旋流燃烧器的燃烧火焰面随着化学当量比的增加而不断上移, 最高燃烧温度可达 1 450 K。

**关键词:** 旋流燃烧器; 热声不稳定; 化学当量比; 频谱分析

## 0 引言

目前, 贫燃预混燃烧技术被广泛应用于降低固定式燃气轮机和航空燃气轮机等设备 $\text{NO}_x$ 的排放, 但该技术工程应用中常伴随热声不稳定现象<sup>[1]</sup>, 即在燃烧器内部存在低频大振幅(高强度)的压力脉动, 从而释放高分贝噪声。热声不稳定是燃烧过程中热释放脉动与燃烧室固有声学特性之间耦合形成的一种燃烧不稳定现象。当火焰面热释放脉动与声脉动相位一致时, 即气体微团压缩(膨胀)时吸热(放热), 燃烧室内的压力振荡不断放大, 最终形成持续的大振幅(高强度)压力脉动。热声不稳定将导致燃气轮机工作点偏离设计值, 从而出现局部和事故熄火, 增加污染物排放等。设备长期工作在热声不稳定条件下, 将产生疲劳损伤, 缩短其使用寿命。

近年来旋流燃烧器的热声不稳定现象得到广泛关注, 如Hardalupas<sup>[2]</sup>研究了旋流燃烧器喷口附近化学当量比的脉动情况, 火焰基部的化学当量比抖动非常厉害(0.2~1.8), 对燃料混合与热声不稳定的激发产生重要影响。Giezendanner<sup>[3]</sup>测量了旋流燃烧器热声不稳定时的轴向速度、压力、温度和热释放率的瞬时值, 得到了 2 个重要结论: 一是轴向速度脉

基金项目: 国家自然科学基金项目(50576081, 60534030)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50576081, 60534030).

动剧烈；二是温度、热释放率和压力三者的脉动相位是一致的。Tribbett<sup>[4]</sup>测量了旋流燃烧器产生热声不稳定时的二维速度、气体组分、温度和压力。Bellows<sup>[5]</sup>研究了旋流燃烧器的非线性效应，首次发现了火焰参数不稳定，并认为这种不稳定是由于火焰面附近密度跳变产生的气流加速引起的。Li<sup>[6]</sup>研究了旋流燃烧器的贫燃吹熄极限化学当量比，发现燃烧器工作在贫燃吹熄极限化学当量比附近时，低频的温度脉动迅速增大。Meier<sup>[7]</sup>测量了旋流燃烧器的三维脉动速度、OH根化学荧光发光、脉动温度、脉动压力和主要的气体组分。关于旋流燃烧器热声不稳定的研究可参考文献[8-10]。

目前国内尚未出现关于旋流燃烧器热声不稳定的研究成果，相关的研究均采用Rijke型燃烧器。Rijke型燃烧器为两端开口或一端开口一端封闭的直管，热源位于管内下半部分。Rijke型燃烧器结构简单，流动位于层流区域，与燃气轮机中的旋流燃烧器差别很大。国内从事这方面研究的学者有韩飞<sup>[11-12]</sup>、朱永波<sup>[13]</sup>、陈福连<sup>[14]</sup>、任建兴<sup>[15]</sup>和刘继平<sup>[16]</sup>等。关于Rijke型燃烧器的基本理论可参见文献[17-18]。因此搭建实验室规模的旋流燃烧器，进行热声不稳定研究对探索现代燃气轮机热声不稳定的内在物理机理是必要的。

基于以上研究成果，参考 Capstone 公司 C30 系列燃气轮机的配风结构，引入一些自行设计的控制理念，设计搭建了可调型旋流燃烧器热声不稳定试验台架。试验测量了旋流燃烧器的温度分布和脉动压力，研究了化学当量比对旋流燃烧器热声不稳定特性的影响，得到了压力脉动幅值和频率随化学当量比的变化规律，为深入理解旋流燃烧器的热声不稳定特性提供参考。

## 1 试验简介

### 1.1 旋流燃烧器

旋流燃烧器结构示意图如图 1 所示。旋流燃烧器分为配风系统和燃烧腔 2 部分，其高度分别为 200 mm 和 600 mm。配风系统分为燃料风、直流二次风、旋流二次风和高动量三次风。燃料风管是内径为 6 mm，外径为 8 mm 的不锈钢圆管，在底部分两路以对冲方式进气。直流二次风管和旋流二次风管是内径为 12 mm 的不锈钢圆管；在底部分 2 路以对冲方式引入直流二次风，在距离燃烧腔为 60 mm 的位置分 3 路以切向方式引入旋流二次风；旋流二次风的引风管为内径 4 mm，外径 6 mm 的不锈钢圆

管，每根引风管均为倾斜安装，与水平方向成 15° 夹角。高动量三次风风管是为控制旋流中心回流区的涡系结构而设计的不锈钢圆管(内径 2 mm，外径 3 mm)，可沿垂直方向上下移动，设计有标度。本文试验中，关闭直流二次风和高动量三次风，且高动量三次风的喷口伸出高度为 0。燃烧腔是内径为 24 mm 的不锈钢圆管，燃料风管直径与燃烧腔直径比为 0.25。燃烧腔内相对的两侧设计有压力传感器安装口和热电偶安装口，压力传感器安装口标高为 300 mm，热电偶安装口标高分别为 30、80、120、160、200、300 和 580 mm。

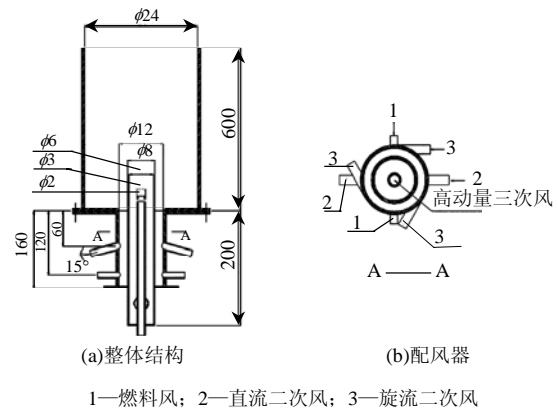


图 1 旋流燃烧器结构示意图

Fig. 1 Sketch map of experiment system

### 1.2 测量系统

试验采用的燃料和氧化剂分别为甲烷和压缩空气，气体流量由 Alicat 质量流量控制器实现精确控制，其精度为 0.8%。压力传感器采用 CGY-1406 动态压力传感器，精度为 0.5%，频响范围为 0~20 kHz，采用半无限法 T 型接口测压，以消除引压管的反射效应，半无限端接 5 米长的硅胶管。脉动压力是本试验测量的关键信号，试验引入 HP VXI 系列高性能动态数据采集控制系统。系统主机为 VXI 8401A；采用 HP E1432A 数据采集模块，内建 8 通道并行采样通道，采样速度为 51 200 个/s，精度为读数的 0.01%，其先进先出堆栈(first-in-first-out, FIFO)大小为 2 兆字节；配合使用 HP E8491A 通讯模块与计算机实现通讯；通讯使用 IEEE-1394 电缆。使用 Agilent VEE 开发了高速连续并行的实时数据采集程序，经测试该程序能稳定高效运行。试验的温度信号由 HP 34970A 主机配合 HP 34908A 数据采集接线模块进行采集。HP 34970A 主机精度为 6 位半，HP 34908A 为 40 通道带隔离的接线模块。

### 1.3 试验工况

试验开展了一系列工况的研究，图 1 所示为可

调型旋流燃烧器,旋流二次风量开度的变化可实现旋流强度的调节,但旋流强度的确定需要测量喷口的三维速度场,需要借助 PLIF、LDV 和 PIV 等设备。本文试验关闭直流二次风,旋流二次风的总流量固定为 316.7 mL/s,通过调节燃料风流量来控制系统的化学当量比。试验开展的工况见表 1,对于本文的试验工况,采用大涡模拟方法模拟其冷态流场,各个试验工况下的旋流强度约为 0.243。

表 1 试验工况表  
Tab. 1 Experimental cases

工况	空气/(mL/s)	甲烷/(mL/s)	化学当量比 $\phi$
1	316.7	18.3	0.55
2	316.7	21.7	0.65
3	316.7	25.0	0.75
4	316.7	28.3	0.85
5	316.7	31.7	0.95
6	316.7	35.0	1.05
7	316.7	38.3	1.15

## 2 试验结果及分析

### 2.1 压力波形及频谱分析

图 2~4 分别给出工况 2、工况 4 和工况 7 的脉动压力波形及其频谱分析。压力波形图采用直线相连的试验数据点来表示,没有采用任何拟合处理;频谱分析采用了连续采样的 128 000 个数据点,加窗函数为 Hanning 函数。

由图 2(a)、3(a)和 4(a)可见,脉动压力波形的第 1 个特点是波形线光滑,说明试验使用的高速数据

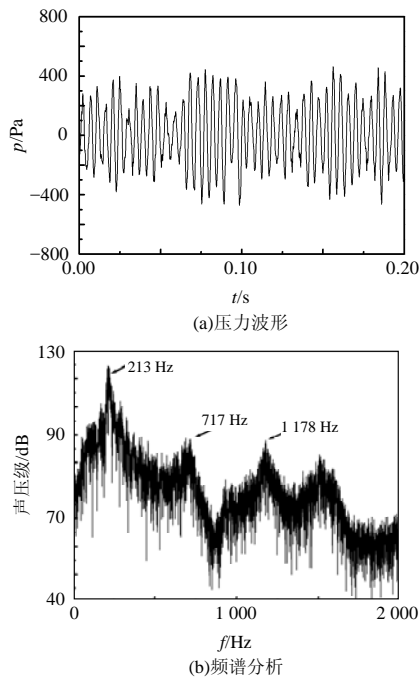


图 2 工况 1 的频谱分析  
Fig. 2 Spectrum analysis of case 1

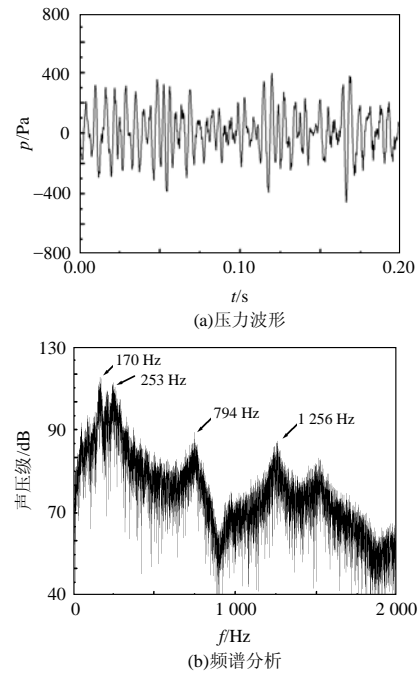


图 3 工况 4 的频谱分析  
Fig. 3 Spectrum analysis of case 4

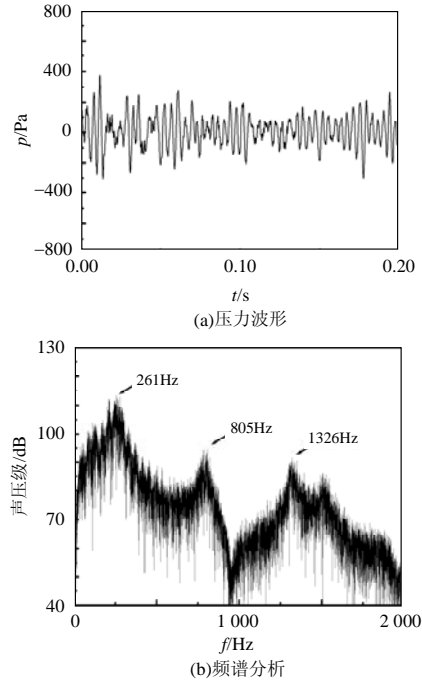


图 4 工况 7 的频谱分析  
Fig. 4 Spectrum analysis of case 7

采集系统能完全满足脉动压力信号的响应要求。第 2 个特点是压力幅值很大,最大可达 450 Pa,已接近工业燃气轮机的压力脉动幅值。Hobson<sup>[19]</sup>测量了一系列 150 MW 级工业燃气轮机的热声不稳定特性,获得的脉动压力介于 200~800 Pa 之间。脉动压力波形的第 3 个特点是压力波形忽高忽低,与 Rijke 型燃烧器的压力脉动波形差别很大,不能近似为均匀的正弦波形;此外,仔细对比图 2(a)、3(a)和 4(a)

可以发现，不同工况下脉动压力波形的密度不同，说明脉动频率发生了变化。脉动压力波形的第 4 个特点是随着化学当量比的增加，脉动压力的强烈程度不断下降。

由图 2(b)、3(b)和 4(b)的频谱分析可见，频谱分析结果的第 1 个特点就是采集得到的信号信噪比不高，而本试验采用的压力传感器和数据采集系统曾被多次使用于测量 Rijke 型燃烧器热声不稳定的压力脉动，采集得到的信号信噪比很高。可推断出频谱分析结果表面上的低信噪比并不是由于信号源的低信噪比造成的，而是由快速傅里叶变换本身局限性引起的。快速傅里叶变换认为信号源是时不变信号，而事实上本试验的信号可能是时变信号，因此产生了图 2(b)、3(b)和 4(b)的分析结果。

虽然频谱分析结果的信噪比较低，但分析结果仍然给出了旋流燃烧器热声不稳定脉动压力的频域特性。今后工作中，需要在频谱分析的基础上采用联合时频分析等更高级信号处理方法来分析试验数据，以进一步探索压力脉动信号的频域特性。

频谱分析结果的第 2 个特点就是脉动压力呈现出主要不稳定模式与次要不稳定模式共存的多峰现象，而且峰值频率随化学当量比的变化而变化，发生了一定幅度的平移。主要不稳定模式与次要不稳定模式共存的现象说明了第 1 阶不稳定模式到达了极限周期振荡状态，燃烧器内富余的声能激发起高阶不稳定模式进行声能耗散，相关的理论解析可参考文献[17-18]。

2.2 压力幅值、频率和温度的变化规律

图 5 给出了所有试验工况下脉动压力幅值随化学当量比的变化规律；图 6 给出了所有试验工况下热声不稳定共振频率随化学当量比的变化规律；图 7 给出了化学当量比为 0.65、0.85、0.95 和 1.15 共 4 种工况下旋流燃烧器燃烧腔内的温度沿高度方向的变化规律。

由图 5 可以看出，当化学当量比小于 1.0 时，旋流燃烧器的热声不稳定强度较化学当量比大于 1.0 时的强度大，并随着化学当量比的增加而降低，其原因是贫燃条件下局部熄火更为严重<sup>[1, 20]</sup>。最大的声压级为 124.5 dB，最小的声压级为 113.2 dB，两者相差 11 dB。需注意的是，虽然频谱分析得出的最大声压级只有 124.5 dB，但最大脉动压力可达 450 Pa，对应的瞬时声压级为 147 dB。旋流燃烧器热声不稳定的声压级并非简单地随着化学当量比的增大而线性减小，而是在化学当量比为 1.0 附近有一

个小幅度的跃升，然后迅速减小。由图 6(a)可以看出，旋流燃烧器的第 1 阶热声共振频率随着化学当量比的增加而减小，在化学当量比为 0.85 时第 1 阶热声共振频率有一较大的跃升，而后随着化学当量比的增加而缓慢上升。第 1 阶热声共振频率的最低值为 187 Hz，最大值为 261 Hz，说明化学当量比对旋流燃烧器的热声共振频率具有重要影响。图 6(b)中，旋流燃烧器的第 3 阶和第 5 阶热声共振频率都是随着化学当量的增加而缓慢增加。其中，第 3 阶热声共振频率最小值为 717 Hz，最大值为 805 Hz；第 5 阶热声共振频率的最小值为 1 178 Hz，最大值为 1 326 Hz。由图 7 的温度分布图可以看出，旋流燃烧器的燃烧火焰面并不是固定在某一位置，而是随着化学当量比的增加而不断上移。当 $\phi=0.95$  时，燃

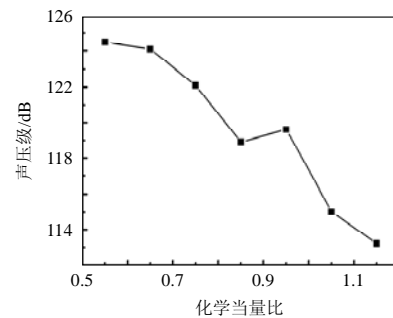


图 5 声压级随化学当量比的变化  
Fig. 5 Variation of sound pressure level with the equivalence ratio

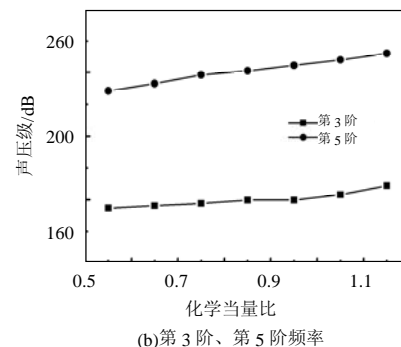
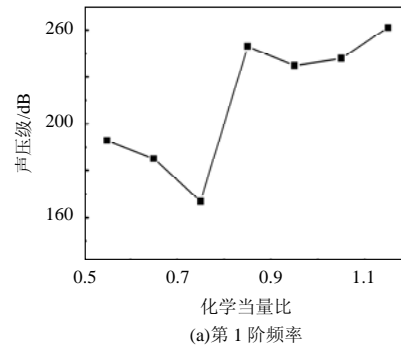


图 6 共振频率随化学当量比的变化  
Fig. 6 Variation of resonant frequencies with the equivalence ratio

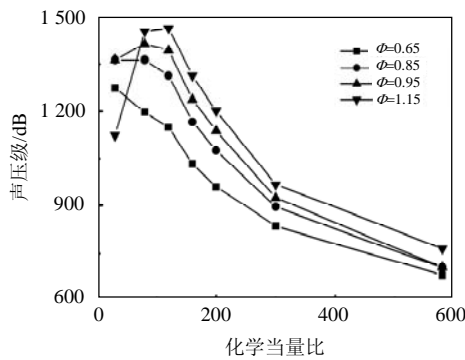


图7 燃烧腔内温度随高度的分布  
Fig. 7 Distribution of temperature inside the combustion chamber

烧腔内的最大温度发生在燃料风喷口上方 80 mm 处；当  $\phi=1.15$  时，燃烧腔内的最大温度发生在燃料风喷口上方 120 mm 处，本文试验的最高燃烧温度可达 1450 K。

### 3 结论

搭建了旋流燃烧器热声不稳定试验台架，开发了高速连续并行的实时数据采集程序，进行了多工况试验研究，结论如下：

(1) 旋流燃烧器热声不稳定的脉动压力可达 450 Pa，压力波形呈现出忽高忽低的现象；试验得到的热声共振频谱呈现出主要共振模式与次要共振模式共存的多峰现象。第 1 阶共振频率介于 187~261 Hz 之间；第 3 阶共振频率介于 717~805 Hz 之间；第 5 阶共振频率介于 1178~1326 Hz 之间。

(2) 化学当量比对旋流燃烧器热声不稳定的压力幅值和共振频率具有重要影响。脉动压力幅值随着化学当量比增大而减小；第 1 阶共振频率随着化学当量比的增大先减小后增大；第 3 阶和第 5 阶热声不稳定的共振频率随着化学当量比的增大而缓慢增大。

(3) 旋流燃烧器的燃烧火焰面并非固定在某一位置，而是随着化学当量比的增加而不断上移。本文试验的最高燃烧温度可达 1450 K。

### 参考文献

[1] Dowling A P. The challenges of lean premixed combustion [C]. Proceedings of the International Gas Turbine Congress, Tokyo, 2003.  
[2] Hardalupas Y, Orain M. Local equivalence ratio and degree of premixedness of reacting mixture in swirl-stabilized natural gas fuelled burners[C]. AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2005.  
[3] Giezendanner R, Weigand P, Duan X R, et al. Laser-based

investigations of periodic combustion instabilities in a gas turbine model combustor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(3): 492-496.

- [4] Tribbett E J, Sipperley C M, Huh J Y, et al. Experimental study of confined, swirling, nonpremixed gas flame for validation of simulation[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(1): 158-168.  
[5] Bellows B D, Neumeier Y, Lieuwen T. Forced response of a swirling, premixed flame to flow disturbances[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(5): 1075-1084.  
[6] Li H, Zhou X, Jeffries J B, Hanson R K. Sensing and control of combustion instabilities in swirl-stabilized combustors using diode-laser absorption[J]. AIAA Journal, 2007, 45(2): 390-398.  
[7] Meier W, Weigand P, Duan X R, Giezendanner Thoben R. Detailed characterization of the dynamics of thermoacoustic pulsations in a lean premixed swirl flames[J]. Combustion and Flame, 2007, 150 (1-2): 2-26.  
[8] Keller J J. Thermoacoustic oscillations in combustion chambers of gas turbines[J]. AIAA Journal, 1995, 33(12): 2280-2287.  
[9] Renard P H, Thévenin D, Rolon J C, et al. Dynamics of flame/vortex interactions[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000, 26(3): 225-282.  
[10] Syred N. A review of oscillation mechanisms and the role of the processing vortex core(PVC) in swirl combustion systems [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(2): 93-161.  
[11] 韩飞, 沙家正. Rijke 管热声非线性不稳定增长过程的研究[J]. 声学学报, 1996, 21 (4): 362-367.  
Han Fei, Sha Jiazheng. Study on nonlinear increasing procedure of Rijke thermoacoustical instability[J]. Acta Acustica, 1996, 21(4): 362-367 (in Chinese).  
[12] 韩飞, 岳国森, 沙家正. Rijke 热声振荡的非线性效应[J]. 声学学报, 1997, 22(3): 249-254.  
Han Fei, Yue Guosen, Sha Jiazheng. Nonlinear effect of Rijke thermoacoustic oscillation[J]. Acta Acustica, 1997, 22(3): 249-254 (in Chinese).  
[13] 朱永波, 刘克, 程明昆. Rijke 管的实验研究和理论分析[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(6): 706-708.  
Zhu Yongbo, Liu Ke, Cheng Mingkun. Experimental investigation and theoretical analysis on Rijke tube[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(6): 706-708(in Chinese).  
[14] 陈福连, 陈翔, 鲍卫兵. Rijke-zt 型脉动燃烧器的频率特性研究[J]. 声学学报, 2004, 29(6): 521-524.  
Chen Fulian, Chen Xiang, Bao Weibing. Investigation on frequency response of Rijke-ZT type vavleless self-exciting combustors [J]. Acta Acustica, 2004, 29(6): 521-524(in Chinese).  
[15] 任建兴, 熊强, 唐晓军, 等. 新型 Rijke 管燃烧装置特性分析[J]. 燃烧科学技术, 2000, 6(2): 175-178.  
Ren Jianxing, Xiong Qiang, Tang Xiaojun, et al. Analysis and study on the character of a new-type Rijke tube combustor[J]. Journal of Combustion and Technology, 2000, 6(2): 175-178(in Chinese).  
[16] 刘继平, 周志杰, 种道彤, 等. 热声波数值模拟的虚假振荡研究

- [J]. 工程热物理学报, 2006, 27(4): 658-660.
- Liu Jiping, Zhou Zhijie, Chong Daotong, et al. Numerical oscillatory on the simulation of thermoacoustic waves[J]. Journal of engineering thermophysics, 2006, 27(4): 658-660 (in Chinese).
- [17] 马大猷. 热声学的基本理论和非线性, I 热声学[J]. 声学学报, 1999, 24(4): 337-350.
- Ma Dayou. Theory and nonlinearity of thermoacoustics[J], Acta Acustica, 1999, 24(4): 337-350 (in Chinese).
- [18] 马大猷. 热声学的基本理论和非线性, II 热声管中的非线性声波 [J]. 声学学报, 1999, 24(5): 449-462.
- Ma Dayou. Theory and nonlinearity of thermoacoustics II. nonlinear sound waves in a thermoacoustic tube[J]. Acta Acustica. 1999, 24 (5): 449-462(in Chinese).
- [19] Hobson D E, Fackrell J E, Hewitt G. Combustion instabilities in industrial gas turbines-measurements on operating plant and thermoacoustic modeling[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122(3): 420-428.
- [20] Mcmanus K R, Poinot T, Candel S M. A review of active control of combustion instabilities[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1993, 19(1): 1-29.

收稿日期: 2007-10-23。

作者简介:

李国能(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事燃烧过程热声不稳定控制的研究, guonengli@zju.edu.cn;

周昊(1973—), 男, 教授, 主要从事低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术、计算流体力学等方面的研究, 通讯作者, zhouhao@cme.zju.edu.cn;

李时宇(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事燃烧过程热声不稳定控制研究;

岑可法(1935—), 男, 工程院院士, 主要从事能源与环境领域的研究。

(责任编辑 车德竞)