

# 黎开预混燃烧器热声不稳定的试验研究

李国能, 周昊, 尤鸿燕, 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)

## Experimental Study of Thermoacoustic Instability in Premixed Rijke Combustor

LI Guo-neng, ZHOU Hao, YOU Hong-yan, CEN Ke-fa

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

**ABSTRACT:** In order to probe into the mechanism of the excitation of thermoacoustic instability in the process of combustion, experimental setup was built to study the thermoacoustic phenomenon in the premixed Rijke combustor. A closed-open Rijke combustor with 40 mm in diameter and 1066 mm in length was used. The flame holder made of dense cordierite was installed in the quarter of the combustor. The premixed gas of methane and air was ignited just downstream of the flame holder to form a flat flame. Experimental results show that the equivalence ratio  $\phi$  has a significant effect on the intensity of thermoacoustic instability. In order to sustain the combustion in the Rijke combustor, the inferior and superior limit of the equivalent ratio was 0.63 and 1.75 separately. The largest intensity of thermoacoustic instability occurs when  $\phi$  at about 1.30 other than 1.0. The intensity of thermoacoustic instability maintains at a relatively large level when  $\phi$  at the range of 1.0~1.5.

**KEY WORDS:** premixed combustion; thermoacoustic instability; equivalence ratio

**摘要:** 为探索燃烧过程中热声不稳定的产生机理, 搭建了黎开(Rijke)预混燃烧器热声不稳定研究试验台架, 并进行了试验研究。Rijke 预混燃烧器为直径 40 mm, 管长 1066 mm 的不锈钢圆管, 下端封闭, 上端开口; 致密堇青石材质的多孔介质稳燃体位于燃烧器四分之一管长处, 甲烷与空气的预混气体在稳燃体上方燃烧形成平面火焰作为加热热源。试验发现, 化学当量比  $\phi$  对 Rijke 预混燃烧器内热声不稳定的强度有重要的影响, 维持 Rijke 预混燃烧器持续燃烧的下限极限化学当量比和上限极限化学当量比分别为 0.63 和 1.75。另外, 试验发现了预混燃烧器内热声不稳定的最大强度并非发生在  $\phi=1.0$  时, 而是在  $\phi=1.30$  左右; 并且当  $1.0 \leq \phi \leq 1.5$  时, 预混燃烧器内的热声不稳定均维持较高的强度。

**关键词:** 预混燃烧; 热声不稳定; 化学当量比

## 0 引言

现代工业中, 燃气轮机以其结构紧凑、操作简单、工作可靠和功率输出范围大等优点被广泛应用, 它提供数百千瓦到数百兆瓦的功率输出。近数十年来, 人们一直致力于在保证燃气轮机工作可靠性的前提下, 提高其燃烧效率和减少污染物( $\text{NO}_x$ )的排放。随着环保要求越来越严格, 低 $\text{NO}_x$ 燃气轮机被广泛应用于工业生产中, 其工作过程中遇到了严重的被称为“热声不稳定”(thermoacoustic instability)的燃烧不稳定问题<sup>[1]</sup>, 即燃烧过程中火焰的热释放脉动与燃烧室固有声学脉动之间耦合造成的一种燃烧不稳定现象, 其产生的条件为著名的瑞利准则: 当燃烧热释放脉动与燃烧室声场的相位一致时, 燃烧室内的压力振荡被不断加强, 最后形成稳定的大振幅压力振荡。

近年来, 热声不稳定的利与弊吸引了全世界广泛的研究。在低温领域, 热声不稳定现象被应用于制冷领域, 成功地研制出高效率的行波发动机<sup>[2]</sup>, 从而结合小孔型脉管制冷机可以研制出完全没有机械运动部件的制冷设备<sup>[3]</sup>, 或者结合弯曲支撑型直线电机可以研制出无机械运动部件的热声发电系统<sup>[4]</sup>。在国外, 美国 Los Alamos 实验室研究热声制冷机最为权威<sup>[2,4-6]</sup>。在国内, 浙江大学低温研究所邱黎明、陈国邦等人的小组搭建了大型多功能热声发动机制冷试验平台<sup>[3,7-8]</sup>; 中科院罗二仓领导的小组研究了高压比聚能型热声发动机及热声非线性<sup>[9-10]</sup>。值得注意的是, 这些研究都是热端-冷端诱发的热声振动, 属于热驱动型, 与传统意义上的热声不稳定有较大的区别, 这一点 Chatterjee<sup>[11]</sup> 在其论文中作了分析讨论。

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).

在燃烧领域,一方面,人们想利用热声不稳定开发出高效的脉动燃烧技术。另一方面,人们追求有效地控制燃烧过程的热声不稳定。热声不稳定会导致燃烧质量下降,增加污染物的排放,甚至出现闪燃、灭火等事故,设备长期工作在热声不稳定条件下会导致设备疲劳损伤,降低其使用寿命。国外的研究文献较多,如 Annaswamy<sup>[12]</sup>、Campos-Delgado<sup>[13]</sup>、Lawn<sup>[14]</sup>、Nord<sup>[15]</sup>等人的论文。在国内,南京大学韩飞<sup>[16-17]</sup>研究了黎开(Rijke)管中的非线性;中科院声学所朱永波<sup>[18]</sup>研究了Rijke管中热源位置和温度参数对发声频谱的影响;浙江工业大学陈福连<sup>[19]</sup>研究了一种新型脉动燃烧器的频率特性;上海电力大学任建兴<sup>[20]</sup>研究了一种新型Rijke管的热源位置、进口流速、温度梯度和气体密度等参数对声场强度的影响;最近,刘继平<sup>[21]</sup>研究了由边界加热突变引起的非稳态热声波。本文在前人工作的基础上,搭建了Rijke预混燃烧器热声不稳定研究试验台架,采用预混燃烧方式作为加热热源<sup>[15-19]</sup>,使得试验过程更接近现实设备,同时也增加了试验的复杂性。试验通过研究不同化学当量比下预混燃烧器内的热声不稳定现象,以获得Rijke预混燃烧器热声不稳定强度和频率与化学当量比之间的相互关系,同时可获得维持Rijke预混燃烧器持续燃烧的极限化学当量比。

## 1 试验装置

图 1 为自行设计建造的 Rijke 预混燃烧器热声不稳定研究试验台架的系统图。压缩空气和甲烷分别经过 D07 系列质量流量控制器以实现压缩空气和甲烷流量的精确控制,其精度为 1.5%。试验燃烧器为直径 40 mm,管长 1 066 mm 的不锈钢圆管,管壁厚度为 4 mm,外壁面裸露在空气中,没有保温层;燃烧器下端封闭,上端开口,致密堇青石材质的多孔介质稳燃体位于燃烧器四分之一管长处,甲烷与空气预混气体在稳燃体上方燃烧形成平面火焰作为加热热源。T1 到 T6 为 S 型热电偶,精度为 0.25%;压力传感器安装在标高 546 mm 处,其精度为 0.5%。温度传感器的温度信号由 HP 34970A 主机,配合 HP 34908A 模块进行采集,其精度均为 6 位半。压力信号的采集是本试验开展的难点所在,由于燃烧器内压力波动相当迅速,为了保证采集得到的信号不会失真,必需有足够快的采样速度。本试验平台的搭建过程中,引进

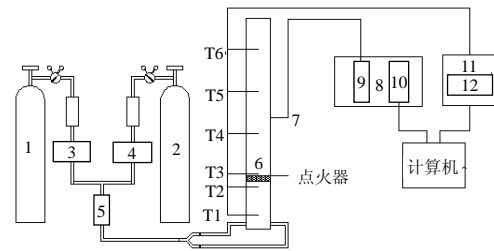


图 1 试验系统示意图

Fig. 1 The schematic diagram of experimental system

了 HP VXI 系列的高性能多通道数据采集系统,系统主机为 HP VXI E8401A,数据采集模块为 HP E1432A,内建 8 通道并行采样通道。试验开展的工况见表 1,在稳定空气流量的同时调节甲烷的流量以调整化学当量比,由于空气的流量占总流量的 90% 以上,所以,预混气体总流量的改变是很小的。

图 1 中 1 为甲烷,2 为压缩空气,3、4 为质量流量控制器,5 为预混腔,6 为火焰稳燃体,7 为动态压力传感器,8 为 HP VXI 主机,9 为 HP E1432A 数据采集模块,10 为 HP E8491A 通讯模块,11 为 HP 34970A 主机,12 为 HP 34908A 数据采集接线模块,T1~T6 为 WPR-100 热电偶。在试验开展过程中,压力信号的采集是试验开展的难点和关键点,为及时准确地采集燃烧器内的压力波动信号,试验选用的动态压力传感器的频响范围为 10 kHz,数据采集模块 HP E1432A 的采样速度为每秒 51 200 样本,其先进先出堆栈(first-in-first-out, FIFO)大小为 2M,选用的 VXI 主机与计算机通信的模块为 HP E8491A,使用 IEEE-1394 电缆。笔者使用 Agilent VEE 开发了高速连续并行的实时数据采集程序,经实际考验,该程序能稳定高效地运行。

表 1 试验工况表

Tab. 1 The experimental cases

序号	$\phi$	空气流量/(L/min)	甲烷流量/(L/min)
1	0.60	4.80	0.30
2	0.63	4.80	0.32
3	0.73	4.80	0.37
4	0.79	4.80	0.40
5	0.89	4.80	0.45
6	0.99	4.80	0.50
7	1.09	4.80	0.55
8	1.19	4.80	0.60
9	1.29	4.80	0.65
10	1.49	4.80	0.75
11	1.59	4.80	0.80
12	1.75	4.80	0.88
13	1.79	4.80	0.90

## 2 试验结果及分析

### 2.1 极限化学当量比、起振过程、熄火过程和极限周期振荡

图 2 给出 Rijke 预混燃烧器在各个化学当量比  $\phi$  的压力振荡波形。由图 2(a)和 2(l)可见，在  $\phi=0.60$  和  $\phi=1.79$  时，Rijke 预混燃烧器内不能维持持续的燃烧，但熄火时的压力波形却不相同，在  $\phi=0.60$  时，其渐变过程较为明显，持续数秒钟；而在  $\phi=1.79$  时其渐变过程并不明显，在 0.5s 内压力便减小到平衡位置。缓慢地调整甲烷的流量，使得 Rijke 预混燃烧器内维持持续的燃烧，从而获得 Rijke 预混燃烧器的下限极限化学当量比和上限极限化学当量比，分别为 0.63 和 1.75。 $\phi=0.63$  的压力波形见图 2(b)，由图 2(b)可以看到，此时 Rijke 预混燃烧器内维持持续的燃烧，但压力波形较为混乱，燃烧器内出现周期性的短暂熄火，然后重新被高温的火焰稳燃体点燃继续燃烧。

图 3(a)和图 3(b)分别给出  $\phi=1.75$  起振过程和  $\phi=1.79$  熄火过程的压力波形图。可以看到， $\phi=1.75$  的起振过程相当迅速，在 0.2s 内，燃烧器内的压力

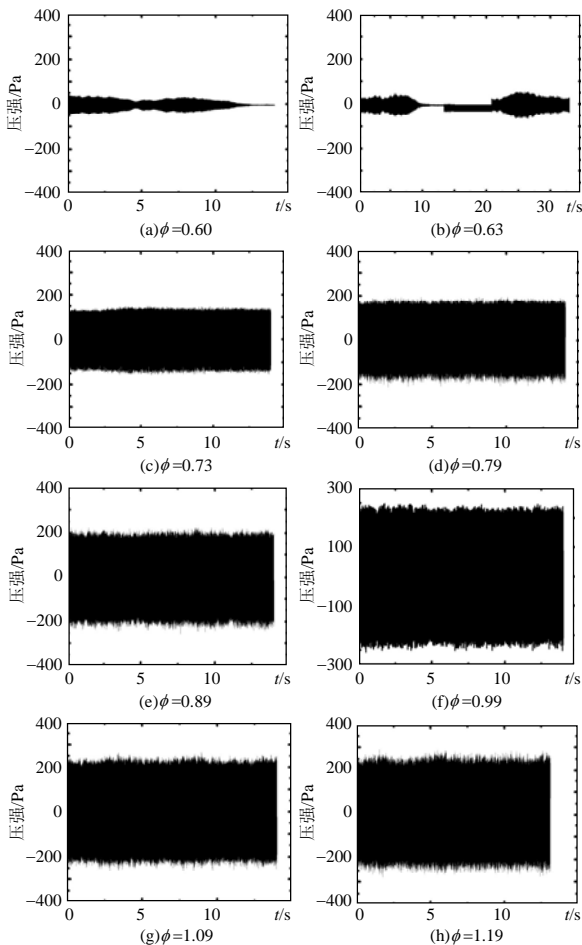


图 2 压力波形

Fig. 2 Pressure waveforms

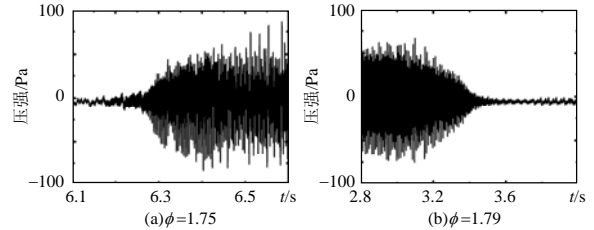


图 3  $\phi=1.75$  的起振过程和  $\phi=1.79$  的熄火过程

Fig. 3 Start-oscillation process of  $\phi=1.75$  and flame extinguishment process of  $\phi=1.79$

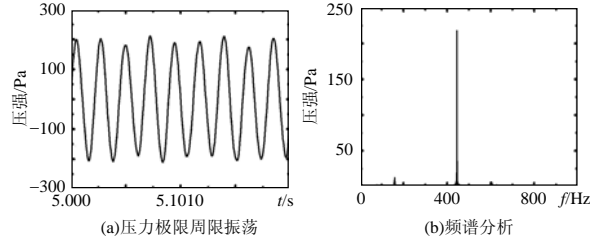


图 4 压力极限周期振荡和频谱分析( $\phi=0.99$ )

Fig. 4 Limit cycle pressure oscillation and spectrum analysis( $\phi=0.99$ )

振荡便加强到幅度约 50 Pa 的振荡； $\phi=1.79$  时燃烧不能持续进行，其熄火时的压力振荡也在 0.2 s 内迅速减小到零点。图 4(a)给出了  $\phi=0.99$  时 Rijke 预混燃烧器内的压力极限周期振荡，由此可以看到，试验采用的数据采集系统可以满足采样速度要求，压力波形不会失真。图 4(b)给出了对应的频谱分析，可以看到，此时的热声不稳定为三阶热声不稳定<sup>[22]</sup>，其频率在 460 Hz 左右，影响频率的参数主要是热源位置和 Rijke 燃烧器的水力直径、长径比<sup>[22]</sup>，而化学当量比不是影响频率的主要参数，不同化学当量比下的热声不稳定频率差别不大。

### 2.2 压力幅值规律和温度变化趋势

从图 2(b)~(k)可以看到，Rijke 预混燃烧器内的压力振荡幅值规律明显。当化学当量比小于 1.0 时，

平均压力幅值随着化学当量比的增加而不断增加；当化学当量比大于 1.0 时，平均压力幅值在 1.0~1.5 之间均维持较高的水平，最大压力幅值发生在  $\phi=1.29$ ，其平均压力幅值约为 268 Pa，这种现象是前人没有发现的，同时具有重要的科研意义，其产生的原因可能是富燃条件下火焰面及其下游小部分区域化学组分的变化造成的<sup>[23]</sup>；当化学当量比继续增加时，平均压力幅值迅速减小。表 2 给出了各个化学当量比下的平均压力幅值和燃烧区域的温度值(T3 处温度值，T3 位于稳燃体上方 20 mm)，同时将此结果绘制成图 5。由图 5(a)可以清晰地看到，当  $1.0 \leq \phi \leq 1.5$  时，平均压力幅值均维持较高水平，这说明了在富燃条件下 Rijke 燃烧器更容易产生热声不稳定，这一研究结论给分级配风的燃烧器设计带来重要参考，在二次风或三次风喷入燃烧室之前，虽然燃烧室内的缺氧燃烧能有效地降低燃烧室的温度水平，大量减少热力  $\text{NO}_x$  的生成；但此时燃烧室处于富燃气氛，热声不稳定更容易发生，一旦热声不稳定发生时，其压力振荡幅值与化学当量比为 1.0 时的压力振荡幅值相比有较大的增加，对燃烧过程和设备结构带来更严重的影响。低  $\text{NO}_x$  燃气轮机常遇到的燃烧热声不稳定问题可能就是其分级配风带来的富燃气氛造成的，所以，本文的研究结果给低  $\text{NO}_x$  燃气轮机的设计提供重要的参考。然而，工业燃气轮机不可能工作在富燃条件下，因为这样将浪费燃料，富燃条件只可能在预混段内局部短暂存在。由图 5(b)可见，当化学当量比  $\phi$  小于 1.0 时，温度随着  $\phi$  的增大而增大；当  $1.0 \leq \phi \leq 1.5$  时，温度仍然上升；当  $\phi$  大于 1.5 时，温度急剧下降。由于甲烷流量的改变对总流量的影响很小，所以，当空气量一定，在  $\phi$  小于 1.0 时， $\phi$  的增大使得更多

表 2 试验结果

Tab. 2 Experimental results

序号	$\phi$	平均压力幅值/Pa	平均温度/K	是否持续燃烧
1	0.60	—	—	否
2	0.63	36	733	是
3	0.73	139	773	是
4	0.79	172	798	是
5	0.89	204	823	是
6	0.99	223	836	是
7	1.09	227	889	是
8	1.19	246	901	是
9	1.29	268	911	是
10	1.49	258	933	是
11	1.59	161	876	是
12	1.75	55	858	是
13	1.79	—	—	否

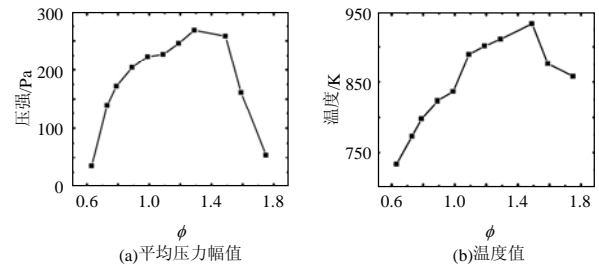


图 5 平均压力幅值和温度值

Fig. 5 Average pressure amplitude and temperature

燃烧热量得以释放，所以温度随着  $\phi$  的增大而增大；在  $\phi$  大于 1.0 时，温度呈现出先上升后下降的规律。

### 3 结论

搭建了 Rijke 预混燃烧器热声不稳定研究试验台架，开发了高速连续并行的实时数据采集程序。试验获得了以下结论：

(1) 化学当量比对 Rijke 预混燃烧器内热声不稳定的强度有重要的影响，维持 Rijke 预混燃烧器持续燃烧的下限极限化学当量比和上限极限化学当量比分别为 0.63 和 1.75。

(2) Rijke 预混燃烧器内热声不稳定的最大强度并非发生在化学当量比  $\phi=1.0$  时，而是在  $\phi=1.30$  左右，其压力幅值超过 250 Pa。

(3) 当  $1.0 \leq \phi \leq 1.5$  时，Rijke 预混燃烧器内的热声不稳定均维持较高的强度，这说明富燃气氛下 Rijke 燃烧器更容易发生燃烧热声不稳定问题。这一研究结果为低  $\text{NO}_x$  燃气轮机的分级配风设计提供重要的参考。

### 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] Backhaus S, Swift G W. A thermoacoustic stirling heat engine [J]. Nature, 1999, 399(6734): 335-338.
- [3] 陈国邦, 汤珂, 金滔. 热声发动机及其脉管制冷机研究进展[J]. 科学通报, 2004, 49(9): 825-834.  
Cheng Guobang, Tang Ke, Jin Tao. Advances in thermoacoustic engine and its application to pulse tube refrigeration[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(9): 825-834(in Chinese).
- [4] Backhaus S, Twand E, Petach M. Traveling-wave thermoacoustic electric generator[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(6): 1085-1087.
- [5] Backhaus S, Swift G W. A thermoacoustic-string heat engine: detailed study[J]. Journal of Acoustic of the Society of American, 2000, 107(6): 3148-3165.
- [6] Swift G W. Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators[J]. Journal of Acoustic of the Society of American, 2003, 113(5): 2379-2381.

- [7] 邱利明, 孙大明, 张武, 等. 大型多功能热声发动机的研制及初步试验: 第一部分热声发动机的研制[J]. 低温工程, 2003, (9), 1-7.  
Qiu Liming, Sun Daming, Zhang Wu, et al. Study of a large-scale multi-function thermoacoustic heat engine with high efficiency: Part I. design and construction of the engine[J]. Cryogenics, 2003, (9): 1-7(in Chinese).
- [8] 邱利明, 张武, 孙大明, 等. 大型多功能热声发动机的研制及初步实验: 第二部分热声发动机的初步实验[J]. 低温工程, 2003, (3): 1-6.  
Qiu Limin, Zhang Wu, Sun Daming, et al. Study of a large-scale multi-function thermoacoustic heat engine with high efficiency Part II. preliminary experiments on the engine[J]. Cryogenics, 2003, (3): 1-6(in Chinese).
- [9] 罗二仓, 凌虹, 戴巍, 等. 采用锥形谐振管的高压比聚能型热声发动机[J]. 科学通报, 2005, 50(3): 605-607.  
Luo Ercang, Ling Hong, Dai Wei, et al. A high pressure-ratio, energy-focused thermoacoustic heat engine with a tapered resonator [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(3): 605-607(in Chinese).
- [10] 胡剑英, 罗二仓. 非线性热声理论的研究进展[J]. 低温与超导, 2005, 33(3): 11-16.  
Hu Jianying, Luo Ercang. Advances in the research of nonlinear thermoacoustic theory[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2005, 33(3): 11-16(in Chinese).
- [11] Chatterjee P, Vandsburger U, Saunders W R, et al. On the spectral characteristics of a self-excited rijke tube combustor: numerical simulation and experimental measurements[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 283(3): 573-588.
- [12] Annaswamy A M, Rumsey J W, Rrasanth R. Thermoacoustic instability: model-based optimal control designs and experimental validation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(6): 905-918.
- [13] Campos-Delgado D U, Zhou K, Allgood D, et al. Active control of combustion instabilities using model-based controllers[J]. Combustion Science and Technology, 2003, 175(1): 27-53.
- [14] Lawn C J, Evesque S, Polifke W. A model for the thermoacoustic response of a premixed swirl burner, part 1: acoustic aspects [J]. Combustion Science and Technology, 2004, 176(88): 1331-1358.
- [15] Nord L. A thermoacoustic characterization of a rijke-type tube combustor[M]. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2000.
- [16] 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).
- [17] 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).
- [18] 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).
- [19] 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).
- [20] 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).
- [21] 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, Zhong Daotong, et al. Numerical oscillatory on the simulation of thermoacoustic waves[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(4): 658-660(in Chinese).
- [22] Kinsler. Fundamentals of acoustics[M]. Third Edition. New York: John Wiley & Sonn Inc., 1982.
- [23] Shalaby H, Thévenin D, Laverdant A. Using DNS to investigate flame/acoustic interaction[C]. Euromech colloquium 467: turbulent flow and noise generation, Marseille, France, 2005.

收稿日期: 2007-04-20.

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NO<sub>x</sub>燃烧技术、计算流体力学等方面的研究, zhouhao@cme.zju.edu.cn;

尤鸿燕(1983—), 女, 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。

(编辑 车德竞)