

CO₂/O₂气氛下黎开型燃烧器热声不稳定特性

周昊, 李国能, 陈君榜, 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)

Characteristics of Thermoacoustic Instability in a Rijke-type Combustor Under CO₂/O₂ Atmosphere

ZHOU Hao, LI Guo-neng, CHEN Jun-bang, CEN Ke-fa

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

ABSTRACT: The objective of this paper is to study the thermoacoustic instability mechanisms of Rijke-type combustor under the CO₂/O₂ atmosphere, an experimental setup has been built. Temperature distributions, combustion completeness and thermoacoustic oscillations were investigated under different combustion powers P_c (oxidant flow rate q_{ox} : 83.3, 116.7 and 150 mL/s), oxygen concentrations X_{O_2} (25% and 30%) and equivalence ratios Φ (0.6, 0.7, 0.8, 0.9 and 1.0). A closed-open stainless tube with a diameter of 40 mm and a length of 1066 mm was used as the combustor, and the flame holder made of dense cordierite was mounted in the cross-section at the quarter place downstream of the combustor inlet. The premixed gas of CO₂/O₂/CH₄ was ignited just downstream of the flame holder. Experimental results showed that the temperature inside the combustion chamber was greatly related to the P_c and Φ . The un-burn-off rate of methane decreases with Φ , showing a good linearity. The excitations of thermoacoustic instability differ a lot with the cases under the air atmosphere, their resonant frequencies are lower than those under the air atmosphere. Results showed that the instabilities did not occur when $\Phi \leq 0.6$ under the condition of $q_{ox} = 83.3$ or 116.7 mL/s, and that the instabilities did not occur when $\Phi \leq 0.7$ under the condition of $q_{ox} = 150$ mL/s.

KEY WORDS: Rijke-type combustor; CO₂/O₂ atmosphere; thermoacoustic instability

摘要: 为研究CO₂/O₂气氛下黎开(Rijke)型燃烧器的热声不稳定机理, 在Rijke型燃烧器热声不稳定特性试验台上测

量了不同燃烧功率 P_c (氧化剂流量 $q_{ox} = q_{O_2} + q_{CO_2}$ 为 83.3、116.7 和 150 mL/s), 不同氧气浓度 X_{O_2} (25%和 30%)和不同化学当量比 Φ (0.6、0.7、0.8、0.9 和 1.0)下的温度分布、燃烧完全性和热声压力脉动特性。Rijke型预混燃烧器下端封闭, 上端开口, 为直径 40 mm, 管长 1 066 mm的不锈钢圆管。稳燃体位于燃烧器 1/4 管长处, 为致密堇青石材质的多孔介质, CO₂/O₂/CH₄的预混气体在稳燃体上方燃烧。试验发现, Rijke型燃烧器的燃烧温度与 P_c 和 Φ 有重要关系, CH₄未燃尽率呈现出良好的线性度, 随着 Φ 的增大而减小。CO₂/O₂气氛下的热声不稳定频率特性与空气气氛下存在明显区别, 其共振频率低于空气气氛下的类似工况结果, 当 $q_{ox} = 83.3$ 或 116.7 mL/s时, $\Phi \leq 0.6$ 的工况不能激发热声不稳定; 当 $q_{ox} = 150$ mL/s时, $\Phi \leq 0.7$ 的工况不能激发热声不稳定。

关键词: 黎开型燃烧器; CO₂/O₂气氛; 热声不稳定

0 引言

近年来, Oxy-fuel燃烧技术(即以CO₂/O₂的混合气代替空气进行燃烧的方式)日渐受到人们的关注^[1-5]。该技术可方便地回收CO₂, 同时由于烟气的再循环燃烧以及燃烧气氛中没有N₂, 使烟气中的NO_x的排放大为降低, 因此, Oxy-fuel燃烧技术一种新型的可以大规模推广应用的先进燃烧技术。

热声不稳定性是现代燃气轮机的常见现象之一^[6]。热声不稳定是燃烧室内燃烧的热释放与当地声场耦合造成的一种燃烧不稳定现象, 其定性的物理机理解释为著名的瑞利准则: 当燃烧热释放脉动与燃烧室声场的相位一致时, 燃烧室内的热能不断转化为声能, 最后形成低频大振幅的压力振荡波。燃烧热声不稳定的存在将导致此类燃烧设备的工作性能下降, 增加NO_x等污染物的排放, 甚至会损坏设备结构。国内外有大量的热声不稳定特性的研究工作。国外的研究文献很多,

基金项目: 国家自然科学基金项目(50576081); 浙江省自然科学基金项目(R107532); 新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0761); 全国优秀博士学位论文作者专项资金(200747); 高等学校学科创新引智计划项目(B08026)。

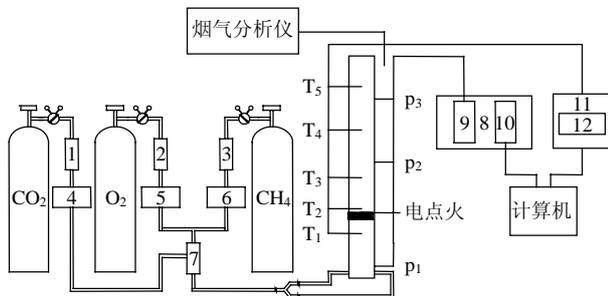
Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50576081).

如Campos-Delgado^[7], Hantschk^[8]、Annaswamy^[9]等人的论文, 详细的研究现状和文献列表参见论文[10-11]。在国内, 燃烧热声不稳定的研究工作尚处于起步阶段^[12-18]。

燃气轮机与Oxy-fuel燃烧技术的组合具有较好的应用前景, 通过气化技术获得合成气后, 随后在燃气轮机中实现Oxy-fuel燃烧, 不仅具有很高的能量转化效率, 同时也便于控制CO₂。本文对CO₂/O₂气氛下Rijke型燃烧器的燃烧特性进行了多工况研究。

1 试验装置

图 1 为本文进行试验研究的Rijke型预混燃烧器热声特性试验台架的系统图。O₂、CO₂和CH₄的气体流量得到了精确控制, 精度为 1% 量程, 控制仪器为Alicat系列质量流量控制器。试验燃烧器为一根不锈钢圆管, 下端封闭, 上端开口, 内径为 40 mm, 管长为 1 066 mm, 管壁厚度为 4 mm, 外壁面不设保温层, 裸露在空气中。燃烧器的稳燃体位于燃烧器 1/4 管长处, 为致密堇青石材质的多孔介质。CO₂/O₂/CH₄的预混气体在稳燃体上方燃烧形成平面火焰。



1~3—稳压罐; 4~6—流量控制器; 7—预混室; 8—HP VXI主机; 9—HP E1432A数采模块; 10—HP E8491A通讯模块; 11—HP 34970A主机; 12—HP 34908A接线开关模块; T₁~T₅—热电偶; p₁~p₃—压力传感器, 精度为 0.5% 量程。

图 1 试验系统示意图
Fig. 1 Test facility

试验选用的动态压力传感器的频响范围为 20 kHz, 并采用半无限法测量燃烧器内的压力振荡, 以避免引压管的反射效应。数据采集模块为HP E1432A, 其采样速度为 51 200 Hz, 采样的精度为读数的 0.01%, 使用了自行开发的高速并行的实时数据采集程序进行压力信号的采集, 软件平台为Agilent VEE。试验采用测量精度为量程的 1% 的罗斯蒙特气体分析仪来测量烟气成分。试验开展了系列的工况研究, 如表 1~3 所示。

表 1 $q_{ox} = 83.3 \text{ mL/s}$ 的试验工况(低热功率)

Tab. 1 Experimental case $q_{ox} = 83.3 \text{ mL/s}$ (low heat power)

编号	$q_{CO_2}/(\text{mL/s})$	$q_{O_2}/(\text{mL/s})$	$q_{CH_4}/(\text{mL/s})$	Φ	$X_{O_2}/\%$
1	58.3	25	12.5	1.0	30
2	58.3	25	11.25	0.9	30
3	58.3	25	10.0	0.8	30
4	58.3	25	8.75	0.7	30
5	58.3	25	7.50	0.6	30
6	62.5	20.83	10.42	1.0	25
7	62.5	20.83	9.375	0.9	25
8	62.5	20.83	8.33	0.8	25
9	62.5	20.83	7.29	0.7	25

表 2 $q_{ox} = 116.7 \text{ mL/s}$ 的试验工况(高热功率)

Tab. 2 Experimental case $q_{ox} = 116.7 \text{ mL/s}$ (medium heat power)

编号	$q_{CO_2}/(\text{mL/s})$	$q_{O_2}/(\text{mL/s})$	$q_{CH_4}/(\text{mL/s})$	Φ	$X_{O_2}/\%$
1	81.7	35	17.5	1.0	30
2	81.7	35	15.75	0.9	30
3	81.7	35	14.0	0.8	30
4	81.7	35	12.25	0.7	30
5	81.7	35	10.5	0.6	30
6	87.5	29.2	14.59	1.0	25
7	87.5	29.2	13.13	0.9	25
8	87.5	29.2	11.67	0.8	25
9	87.5	29.2	10.21	0.7	25

表 3 $q_{ox} = 150 \text{ mL/s}$ 的试验工况(更高热功率)

Tab. 3 Experimental case $q_{ox} = 150 \text{ mL/s}$ (higher heat power)

编号	$q_{CO_2}/(\text{mL/s})$	$q_{O_2}/(\text{mL/s})$	$q_{CH_4}/(\text{mL/s})$	Φ	$X_{O_2}/\%$
1	105	45	22.5	1.0	30
2	105	45	20.25	0.9	30
3	105	45	18.0	0.8	30
4	105	45	15.75	0.7	30
5	105	45	13.5	0.6	30

2 实验结果及分析

2.1 温度分布分析

图 2 是氧化剂流率 $q_{ox} = 83.3 \text{ mL/s}$, $X_{O_2} = 30\%$ 时不同化学当量比下各个工况的温度分布图。本文给出的温度测量结果为热电偶输出的原始数据, 没有进行辐射效应的修正, 只作为沿程烟气温度水平的参考值。由图 2 可见, 随着测点高度的增加, 温度随之下降, 这是由于稳燃体在 0.266 5 m 的位置, 离它越远, 温度越低。另外, 固定氧化剂流率时, 随着化学当量比的减小, 燃烧功率不断减小, 稳燃体附近的最高温度不断下降。 $q_{ox} = 83.3 \text{ mL/s}$, $X_{O_2} = 30\%$ 时, $\Phi = 1.0$ 的最高温度为 1 019.63 K, $\Phi = 0.6$ 的最高温度为 865.26 K, 下降了 154.37 K, 约下降了 15.14%。从图 2 中可以看到 $T_{1.0} > T_{0.9} > T_{0.8} > T_{0.7} > T_{0.6}$, 在相同的氧化剂流率时, 化学当量比为 1.0 的时候, 由于 CO₂/O₂ 的混合比使得没有多余的燃料或氧化剂成为冷却气体, 所以 CH₄ 的燃烧最为

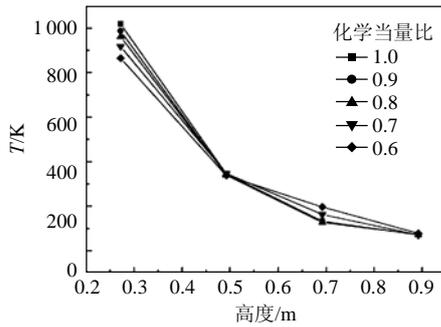


图2 温度分布图($q_{\text{ox}}=83.3\text{ mL/s}$, $X_{\text{O}_2}=30\%$)
Fig. 2 Temperature distribution ($q_{\text{ox}}=83.3\text{ mL/s}$,
 $X_{\text{O}_2}=30\%$)

充分,从而获得了最高的管内温度水平。当化学当量比的减小时,未参与燃烧的 CO_2 和 O_2 成为多余的冷却气体,降低了管内的温度水平。

图3给出了 $q_{\text{ox}}=150\text{ mL/s}$, $X_{\text{O}_2}=30\%$ 时不同化学当量比下各个工况的温度分布图,其变化规律与图2一致。在 $q_{\text{ox}}=150\text{ mL/s}$, $X_{\text{O}_2}=30\%$ 时, $\phi=1.0$ 的最高温度为 1180.67 K , $\phi=0.6$ 时的最高温度为 512.01 K ,下降了 668.66 K ,约下降了 56.6% 。另外,当化学当量比为 0.6 时,稳燃体附近火焰的温度有个急剧的下降,这是由于燃烧火焰上移造成的,继续降低化学当量比系统将不能维持持续燃烧。与图2相比,图3的温度水平更高,图3中化学当量比为 1.0 时稳燃体附近测点的温度为 1180.67 K ,图2中相同位置的温度为 1019.63 K ,高了 161.04 K ,约 15.8% 。这是由于增加了进气量,从而提高了燃烧功率,进而提高了管内的温度水平。

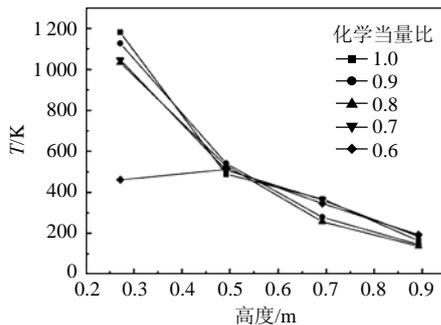


图3 温度分布图($q_{\text{ox}}=150\text{ mL/s}$, $X_{\text{O}_2}=30\%$)
Fig. 3 Temperature distribution ($q_{\text{ox}}=150\text{ mL/s}$,
 $X_{\text{O}_2}=30\%$)

2.2 CH_4 未燃尽率分析

图4给出了 $X_{\text{O}_2}=30\%$ 各工况烟气中的残余氧气浓度,由图4可见,在相同氧气浓度下,当化学当量比增加时,烟气中残余氧气浓度不断下降,燃烧就越充分。当化学当量比 $\phi=0.6$ 时,氧气残余浓度最高,达 13% ;当 $\phi=1.0$ 时,残余氧气浓度为 0.0% 。

另外,同一氧气浓度下各工况的残余氧气浓度呈现出良好的线性度,在不同氧化剂流率下($q_{\text{ox}}=83.3\text{ mL/s}$, $q_{\text{ox}}=116.7\text{ mL/s}$ 和 $q_{\text{ox}}=150\text{ mL/s}$),相同化学当量比的工况的残余氧气浓度相差很小,3条线基本重合;这说明残余氧气浓度的大小和参加反应的氧化剂流率关系不大,但与化学当量比有重要的关系。图5给出了氧气浓度为 25% 时各工况的残余氧气浓度,由图5可见,相同氧气浓度下各工况的残余氧气浓度连线的线性度也都非常好,因 $q_{\text{ox}}=150\text{ mL/s}$ 时系统不能维持工作,因此图5仅给出了2种氧化剂流率下的测量结果。

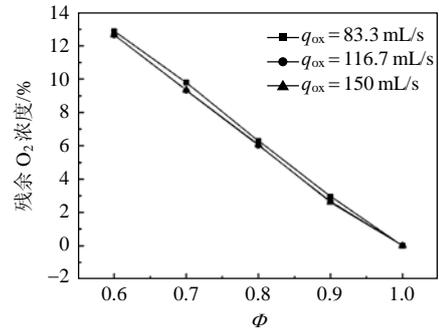


图4 $X_{\text{O}_2}=30\%$ 时的残余 O_2 浓度
Fig. 4 Oxygen concentration ($X_{\text{O}_2}=30\%$)

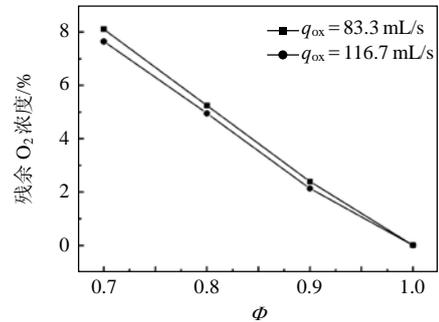


图5 $X_{\text{O}_2}=25\%$ 时的残余 O_2 浓度
Fig. 5 Oxygen concentration ($X_{\text{O}_2}=25\%$)

考察 CH_4 的燃烧完全性时,应该从化学反应式进行研究。基于测量烟气中 O_2 的浓度,同时忽略 CO 产量(10^{-6} 量级),对于 CH_4 燃烧反应有如下的化学反应公式: $\text{CH}_4 + \text{O}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + (\text{残余})\text{O}_2 + (\text{残余})\text{CH}_4$,当 $X_{\text{O}_2}=25\%$ 时,得 $1/2\phi a \text{CH}_4 + a \text{O}_2 + 3a \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + \text{CH}_4$,设氧气流率为 $a/(\text{mL/s})$,那么 CO_2 的流率为 $3a/(\text{mL/s})$, CH_4 流率为 $1/2\phi a/(\text{mL/s})$ 。同时设 x 为烟气中的 O_2 残余量,则参加反应的氧气为 $a-x$,烟气中甲烷的含量为 $1/2\phi a - 1/2\phi(a-x) = 1/2\phi x$, CO_2 的含量为 $3a + 1/2\phi(a-x)$,假设 ξ 为烟气中的氧气浓度,则可通过烟气中测量得到的氧气浓度计算出未参加反应的甲烷 $1/2\phi x$,如式(1)所示,同理可得氧气浓度

为 30% 时的计算公式。

$$\xi = \frac{x}{\frac{1}{2}\Phi x + x + 3a + \frac{1}{2}\Phi a - \frac{1}{2}\Phi x} = \frac{x}{3a + \frac{1}{2}\Phi a + x} \quad (1)$$

根据上述理论可计算得到图 6~7 的结果, 由图 6~7 可见, 同一氧化剂流率下, 随着化学当量比的增加, CH₄ 未燃尽率不断减小, $\Phi=0.6$ 的时候最高, $\Phi=1.0$ 的时候为 0, 呈现出良好的线性度。

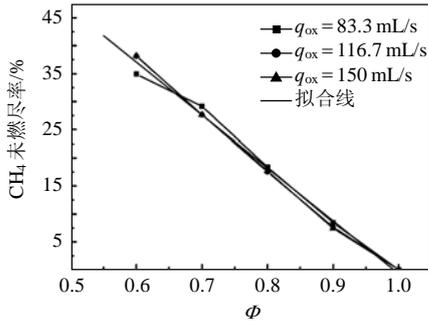


图 6 X_{O₂}=30% 时 CH₄ 未燃尽率

Fig. 6 Methane un-burn-off rate (X_{O₂}=30%)

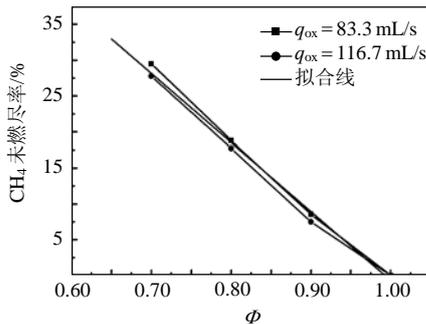


图 7 X_{O₂}=25% 时 CH₄ 未燃尽率

Fig. 7 Methane un-burn-off rate (X_{O₂}=25%)

对图 6~7 中的试验数据进行线性拟合, 其结果如表 4 所示, 拟合结果获得的相关系数超过了 0.99, 这一个结论具有实际参考价值: 在相同的 X_{O₂} 时, CH₄ 的未燃尽率仅与化学当量比成线性关系, 而与燃烧功率无关, 这为设计脉动燃烧器提供了重要的参考。

表 4 CH₄ 未燃尽率的线性拟合

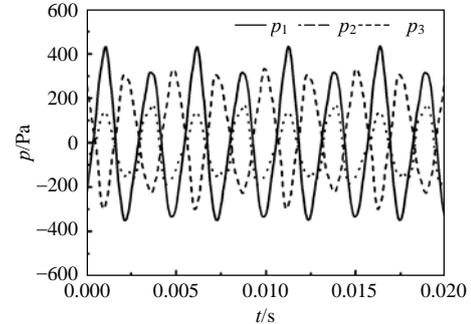
Tab. 4 Linearity fit of un-burn-off rate of CH₄

X _{O₂}	公式	R
25%	y=95.424 5-96.12x	0.997
30%	y=93.684 67-94.396 67x	0.997

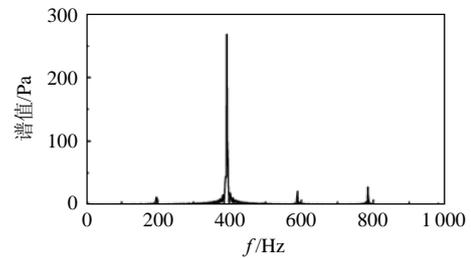
2.3 压力波形及频谱分析

图 8 给出了氧化剂流率 q_{ox} = 83.3 mL/s, X_{O₂} = 30%, $\Phi=1.0$ 时的压力脉动和 p₁ 处频谱分析结果。从图 8(a) 可以看出, Rijke 燃烧器激发起强烈的热声不稳定性, 脉动波形光滑平整, p₁ 振幅约为 400 Pa, p₂ 振幅为 250 Pa 左右, p₃ 振幅约为 160 Pa。从频谱

分析结果可以看到, 此时的热声不稳定的主峰频率在 400 Hz 左右, 在 200、600、800 Hz 处也有很小幅度的振动。图 9 出了 q_{ox} = 116.7 mL/s, X_{O₂} = 30%, $\Phi=1.0$ 的工况的压力波形和频谱分析图。从图 9(a)



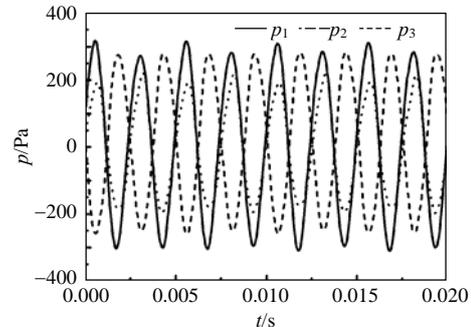
(a) 压力波形



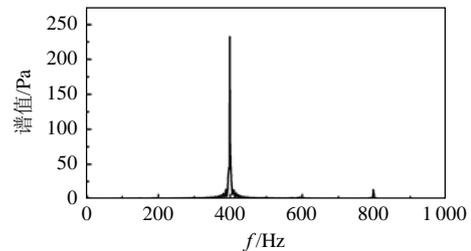
(b) 频谱分析

图 8 热声不稳定的压力波形及频谱分析 (q_{ox} = 83.3 mL/s, X_{O₂} = 30%, $\Phi=1.0$)

Fig. 8 Pressure waveforms and spectrum analysis of thermoacoustic instability (q_{ox} = 83.3 mL/s, X_{O₂} = 30%, $\Phi=1.0$)



(a) 压力波形



(b) 频谱分析

图 9 热声不稳定的压力波形及频谱分析 (q_{ox} = 116.7 mL/s, X_{O₂} = 30%, $\Phi=1.0$)

Fig. 9 Pressure waveforms and spectrum analysis of thermoacoustic instability (q_{ox} = 116.7 mL/s, X_{O₂} = 30%, $\Phi=1.0$)

可以看出,此时的振动强度比图8所示的工况的强度小, p_1 振幅降到了300 Pa左右, p_2 振幅变化不大,维持在250 Pa左右, p_3 振幅在200 Pa左右。图10出了 $q_{ox}=150\text{ mL/s}$, $X_{O_2}=30\%$, $\Phi=1.0$ 的工况1的压力脉动和频谱分析结果。从图10(a)中可以看到, p_1 振幅约为350 Pa, p_2 振幅约为220 Pa, p_3 振幅约为180 Pa。仔细对比分析图8到图10的频谱分析结果,当氧化剂流率 $q_{ox}=83.3\text{ mL/s}$, $X_{O_2}=30\%$, $\Phi=1.0$ 时,热声不稳定的共振频率为392 Hz;当 $q_{ox}=116.7\text{ mL/s}$, $X_{O_2}=30\%$, $\Phi=1.0$ 时,热声不稳定共振频率为401 Hz;当 $q_{ox}=150\text{ mL/s}$, $X_{O_2}=30\%$, $\Phi=1.0$ 时,热声不稳定的共振频率为420 Hz。热声不稳定共振频率随着燃烧功率的增加而上升,这主要是由于燃烧室内的温度水平升高所导致的^[19]。

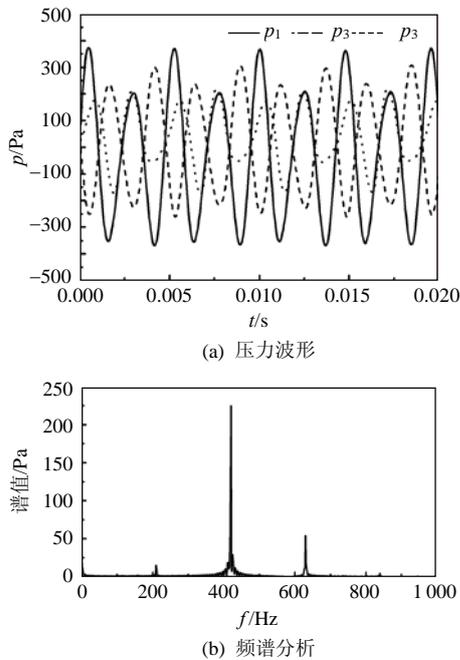


图10 热声不稳定的压力波形及频谱分析($q_{ox}=150\text{ mL/s}$,
 $X_{O_2}=30\%$, $\Phi=1.0$)

Fig. 10 Pressure waveforms and spectrum analysis of thermoacoustic instability ($q_{ox}=150\text{ mL/s}$,
 $X_{O_2}=30\%$, $\Phi=1.0$)

2.4 热声不稳定特性的分析

图11给出了氧气浓度为30%时所有试验工况能否激发起热声不稳定的区域划分图。图11中每个点代表一个工况,在固定化学当量比时,纵坐标越大表示燃烧功率越大。如图11所示,区域I中没有发生热声不稳定,区域II激发了热声不稳定。由图11可见,在 CO_2/O_2 气氛下,Rijke型燃烧器激发热声不稳定时存在着明显的区域差别,在 $q_{ox} =$

83.3 mL/s 和 $q_{ox}=116.7\text{ mL/s}$ 的时候,化学当量比从0.7到1.0的工况均激发了热声不稳定,而在化学当量比为0.6的时候没有激发起热声不稳定。当 $q_{ox}=150\text{ mL/s}$ 时,化学当量比从0.8到1.0的工况发生了热声不稳定,化学当量比为0.6和0.7的工况没有激发起热声不稳定。因此,在 CO_2/O_2 气氛下,对于本文采用的Rijke型燃烧器,并非燃烧功率高就能产生热声不稳定,如当 $q_{ox}=116.7\text{ mL/s}$, $X_{O_2}=30\%$, $\Phi=0.7$ 时,系统的燃烧功率为416 W,激发了强烈的热声不稳定;当 $q_{ox}=150\text{ mL/s}$, $X_{O_2}=30\%$, $\Phi=0.7$ 时,系统的燃烧功率为536 W,Rijke型燃烧器没有激发起热声不稳定。 CO_2/O_2 气氛下Rijke型燃烧器产生热声不稳定与化学当量比、氧化剂流率和氧气浓度均存在相互依赖关系,与空气作为氧化剂的情况有很大区别,其共振频率约为400 Hz,远低于空气气氛下的共振频率^[20-21],对于本文所采用的Rijke型燃烧器,空气气氛下激发起的热声不稳定共振频率约为460 Hz^[15]。区域I中的工况没有发生热声不稳定,其内在的物理化学机理仍需要进一步进行深入的研究,如采用更先进的测试手段和计算流体力学方法等。

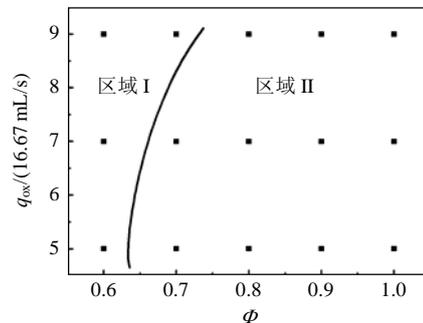


图11 热声不稳定的激发区域(区域II)
Fig. 11 Zones of excitation of thermoacoustic instability (zone II)

3 结论

设计了Rijke型预混燃烧器热声特性台架,Rijke型燃烧器内径为40 mm,管长为1066 mm,热源位置位于1/4管长处。试验进行了系列 CO_2/O_2 气氛下的燃烧工况研究,获得了以下结论:

1) Rijke型燃烧器的燃烧温度与燃烧功率及化学当量比均有重要关系, CH_4 未燃尽率呈现出良好的线性度,随着化学当量比的增大而减小;另外, CH_4 未燃尽率与系统的燃烧功率无关。

2) 对于热声不稳定得以激发的试验工况,其主峰不稳定的频率约为400 Hz,振动幅值约为

400 Pa, 超过 146 dB。

3) CO₂/O₂ 气氛下的热声不稳定的激发特性与空气气氛下的类似工况存在较大差别, 其共振频率低于空气气氛下的试验结果。另外, 当 $q_{ox} = 83.3$ 或 116.7 mL/s 时, $\Phi \leq 0.6$ 时的工况不能激发起热声不稳定; 当 $q_{ox} = 150$ mL/s 时, $\Phi \leq 0.7$ 的工况不能激发起热声不稳定。

参考文献

- [1] Davison J. Performance and costs of power plants with capture and storage of CO₂[J]. Energy, 2007, 32(5): 1163-1176.
- [2] 赵永椿, 张军营, 刘洪涛, 等. O₂/CO₂ 循环燃烧方式下矿物元素蒸发特性的热力学研究[J]. 燃料化学学报, 2006, 34(6): 641-649. Zhao Yongchun, Zhang Junying, Liu Hongtao, et al. Thermodynamic equilibrium study of mineral elements evaporation in O₂/CO₂ recycle combustion[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2006, 34(6): 641-649(in Chinese).
- [3] 孟德润, 赵翔, 周俊虎, 等. 煤在 O₂/CO₂ 中燃烧的 NO_x 释放规律[J]. 化工学报, 2005, 56(12): 2410-2414. Meng Derun, Zhao Xiang, Zhou Junhu, et al. NO_x emissions of coal combustion in O₂/CO₂[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2005, 56(12): 2410-2414(in Chinese).
- [4] 刘彦, 周俊虎, 方磊, 等. CO₂/O₂ 气氛煤粉燃烧及固硫特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 224-228. Liu Yan, Zhou Junhu, Fang Lei, et al. A study on coal combustion and desulfurization characteristics in atmosphere containing O₂/CO₂[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 224-228(in Chinese).
- [5] 韩奎华, 路春美, 侯庆伟, 等. 煤在不同 O₂/CO₂ 气氛下燃烧硫析出特性研究[J]. 燃料化学学报, 2004, 32(5): 517-521. Han Kuihua, Lu Chunmei, Hou Qingwei, et al. The characteristics of sulfur release during coal combustion in the mixed-CO₂ gas with different oxygen concentrations[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2004, 32(5): 517-521(in Chinese).
- [6] Dowling A P. The challenges of lean premixed combustion[C]. the International Gas Turbine Congress, Tokyo, 2003.
- [7] 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.
- [8] Hantschk C C, Vortmeyer D. Numerical simulation of self-excited thermoacoustic instabilities in Rijke tube[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 277(3): 511-522.
- [9] Annaswamy A M, Rumsey J W, Prasanth R. Thermoacoustic instability: model-based optimal control designs and experimental validation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(6): 905-918.
- [10] Keller J J. Thermoacoustic oscillations in combustion chambers of gas turbines[J]. AIAA Journal, 1995, 33(12): 2280-2287.
- [11] 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.
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 张国俊, 钟英杰, 张雪梅, 等. 里克管的数值模拟[J]. 动力工程, 2007, 27(2): 247-281. Zhang Guojun, Zhong Yinjie, Zhang Xuemei, et al. Numerical simulation of Rijke tubes[J]. Journal of Power Engineering, 2007, 27(2): 247-281(in Chinese).
- [15] 李国能, 周昊, 尤鸿燕, 等. 黎开预混燃烧器热声不稳定的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(29): 23-27. Li Guoneng, Zhou Hao, You Hongyan, et al. Experimental study of thermoacoustic instability in premixed Rijke combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(29): 23-27(in Chinese).
- [16] 李国能, 周昊, 尤鸿燕, 等. 黎开管自激热声不稳定的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(23): 50-54. Li Guoneng, Zhou Hao, You Hongyan, et al., Numerical modeling of self-excited thermoacoustic instability in Rijke tube[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(23): 50-54(in Chinese).
- [17] 李国能, 周昊, 李时宇, 等. 化学当量比对旋流燃烧器热声不稳定特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(8): 18-23. Li Guoneng, Zhou Hao, Li Shiyu, et al. Influence of equivalence ratio on characteristics of thermoacoustic instability in a swirl combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(8): 18-23(in Chinese).
- [18] 周昊, 李国能, 岑可法. 燃烧功率对旋流燃烧器热声不稳定特性的影响[J]. 中国电机工程学报. 2008, 28(32): 6-11. Zhou Hao, Li Guoneng, Cen Kefa. Influence of combustion power on characteristics of thermoacoustic instability in a swirl combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(32): 6-11(in Chinese).
- [19] Jones J C. Suggestions towards improved reliability of thermocouple temperature measurement in combustion tests[R]. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.
- [20] Kunz W. Untersuchungen zum anregungsmechanismus thermoakustischer schwingungen am beispiel des Rijke phänomens [D]. München: Technische Universität München, 1981.
- [21] Li Guoneng, Zhou Hao, Cen Kefa. Characteristics of acoustic behavior, combustion completeness and emissions in a Rijke-type combustor [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(17/18): 2144-2149.



周昊

收稿日期: 2008-12-10。

作者简介:

周昊(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事低污染高效燃烧技术的研究, zhouhao@cmee.zju.edu.cn。

(责任编辑 王庆霞)