

基于急速混合管状火焰技术的丙烷富氧燃烧

彭维康, 赵晓尧, 初庆钊, 石保禄, 李军伟, 王宁飞

(北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

摘 要: 采用燃料与氧化剂分别切向注入柱形燃烧室的急速混合管状火焰燃烧技术,开展了丙烷富氧燃烧实验研究,重点分析了火焰结构和燃烧稳定性随氧气摩尔分数 x_{O_2} 的变化规律。丙烷空气实验中,急速混合获得了与预混燃烧相近的均匀稳定层流火焰。以 CO_2 为稀释剂,利用急速混合燃烧分析了不同 x_{O_2} 的火焰特性。结果表明:当 $x_{O_2} \leq 0.5$ 时,在可燃范围内可获得均匀稳定的管状火焰; $x_{O_2} = 0.6$,火焰结构不均匀但仍为稳定层流火焰; x_{O_2} 增加至 0.7 时,仅在低当量比下获得了稳定管状火焰,当量比为 1.0 附近则出现了不稳定燃烧;随着 x_{O_2} 进一步增加,不稳定燃烧范围扩大。实验测量了 $x_{O_2} \leq 0.4$ 的丙烷可燃界限,相同 x_{O_2} 下 N_2 为稀释剂的可燃范围比 CO_2 的大;且在 x_{O_2} 低至 0.125 时仍能燃烧,而 CO_2 为稀释剂时此值为 0.18。

关 键 词: 急速混合; 管状火焰; 富氧燃烧; 丙烷; 火焰结构; 不稳定燃烧

中图分类号: V219

文献标志码: A

Oxy-fuel combustion of propane based on rapidly mixed tubular flame technology

PENG Weikang, ZHAO Xiaoyao, CHU Qingzhao,

SHI Baolu, LI Junwei, WANG Ningfei

(School of Aerospace, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: An inherently safe technique of rapidly mixed tubular flame combustion, with the fuel and oxidizer individually injected into a combustor, was adopted to investigate the oxy-fuel combustion of propane. The variations of flame structure and combustion stability with oxygen mole fraction were addressed. Based on propane/air combustion, it was found that the rapidly mixed combustion could obtain almost the same flame structure as that of the premixed combustion. Thereafter CO_2 was used as the diluent, and combustion tests were conducted under different oxygen mole fractions. Results illustrated that when oxygen mole fraction was no more than 0.5, a uniform and stable tubular flame can be established from lean to rich limit; by increasing oxygen mole fraction to 0.6, the laminar flame became non-uniform in structure, however, the flame was stable; by raising oxygen mole fraction to 0.7, the stable tubular flame was merely obtained at lean combustion, and oscillatory combustion appeared when the equivalence ratio of 1.0. By further increasing oxygen mole fraction, the oscillation region was expanded. The combustion range for propane/oxygen mixture diluted by N_2 and CO_2 was examined when oxygen mole fraction was no more than 0.4. It was found that the flammable range diluted by N_2 was wider than that diluted by CO_2 , and the minimum oxygen mole fraction to sustain propane/oxygen combustion diluted by CO_2 was 0.18,

收稿日期:2016-04-21

作者简介:彭维康(1992—),男,硕士生,主要从事富氧及纯氧燃烧实验研究。

通讯作者:石保禄(1983—),男,副教授、博士生导师,博士,从事富氧及纯氧燃烧研究。E-mail:shibaolu@bit.edu.cn

引用格式:彭维康,赵晓尧,初庆钊,等.基于急速混合管状火焰技术的丙烷富氧燃烧[J].航空动力学报,2017,32(11):2629-2637.

PENG Weikang, ZHAO Xiaoyao, CHU Qingzhao, et al. Oxy-fuel combustion of propane based on rapidly mixed tubular flame technology[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(11): 2629-2637.

higher than that of 0.125 diluted by N_2 .

Key words: rapidly mixed; tubular flame; oxy-fuel combustion; propane; flame structure; oscillatory combustion

近年来笼罩全国众多城市的雾霾造成了大规模的环境灾难,同时,随着 CO_2 排放量的急剧增加,全球温室效应加剧,自然灾害频现,大气污染问题已成为我国面临的最严重的挑战之一。“十三五”中着重提到了低氮低碳新技术改善空气质量的方针,并针对燃气轮机减排出台了固定式燃气轮机大气污染物排放标准,要求进一步降低 NO_x 排放^[1]。近年来,诸多学者就降低燃气轮机 NO_x 排放进行了研究,但 NO_x 排放难以降到 $5 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$ 以下,或者降低 NO_x 时出现了混合不充分、 CO 增加等问题^[2-4]。燃气轮机多使用碳氢燃料与空气燃烧,在高温条件下空气中大量的 N_2 会直接参与化学反应并生成热力型 NO_x 。

近年来,研究人员提出的以 CO_2 为稀释剂的富氧燃烧(oxy-fuel combustion),即 CO_2 与 O_2 作为氧化剂与燃料发生化学反应,一方面有助于从根源上减少热力型 NO_x 排放,另一方面,燃烧产物主要为 CO_2 和 H_2O ,有助于降低 CO_2 的回收和利用成本^[5-6]。目前,欧美研究机构正大力发展基于富氧燃烧的燃气轮机^[7],而我国尚处于起步阶段,加强对碳氢燃料富氧燃烧的基础研究有助于促进我国燃气轮机领域的发展。此外,国内外燃煤发电站也广泛使用了旋流富氧燃烧技术,烟气, SO_x 及 NO_x 等排放量也显著降低^[8-9]。

富氧燃烧中随氧气摩尔分数增加,火焰温度升高,热效率亦显著提高,在工业应用中被视为提高生产率、产品质量并实现低碳低氮排放的最佳途径之一^[10-11]。近年来,以纯氧为氧化剂的高温燃烧技术广泛应用于加工领域,如钢铁、玻璃及陶瓷加工^[12-14],也常用于大推力液体火箭发动机中。但高氧气摩尔分数下,燃烧速度急剧升高,回火问题突出,同时放热量大,易导致不稳定燃烧现象的产生。相关学者针对富氧燃烧开展了大量的基础研究工作,包括以煤粉、液化气及甲烷等为燃料的实验和数值研究^[9,15-16]。在大部分实验研究中,氧化剂中氧气摩尔分数一般低于 0.4^[17-19]。

近年来 Ishizuka 等^[20]提出并发展了无回火的急速混合管状火焰燃烧技术,将燃料与氧化剂分别切向通入圆柱形燃烧室,并在燃烧室内快速混合和燃烧,形成稳定的管状层流火焰。由于混

合和燃烧都在燃烧室内进行,消除了回火危险。所形成的管状火焰带与壁面间是低温高密度的未燃气体,而火焰带内部是高温低密度的燃气,避免了火焰与燃烧器内壁面的直接接触,可保证燃烧室长时间工作,同时减少了热损失,提高了热稳定性和热效率。此外,根据瑞利准则,该火焰具有良好的气动稳定性^[21-23]。

石保禄等^[16]采用内径为 16 mm 的急速混合管状火焰燃烧器实验研究了甲烷富氧燃烧特性,通过将稀释剂分别通入燃料侧和氧化剂侧,在氧气摩尔分数高达 0.86 时仍能获得稳定管状火焰。在该燃烧器的流场可视化研究中,石保禄等^[24]得出当各入口速度相同时,混合时间最短,且当混合特征时间小于或等于化学反应特征时间时,方可获得稳定管状火焰。

丙烷的含碳量和热值更高,可处理原油或天然气获得,易液化存储,价格低廉,多用作发动机、取暖系统及工业燃料,常用的液化石油气的主要成分便是 90% 的丙烷。考虑到丙烷民用和工业应用的普遍性,本文探究了丙烷在急速混合管状火焰燃烧器中的富氧及纯氧燃烧特性,并将稀释剂同时通入燃料和氧化剂入口,均衡各入口流量(本文中流量均指体积流量),保证入口速度尽量一致。

1 实验方案

1.1 急速混合管状火焰燃烧器

本文所采用的急速混合管状火焰燃烧器示意图如图 1 所示,主要由不锈钢结构、石英观察窗和石英管组成,石英观察窗和石英管用于观察和记

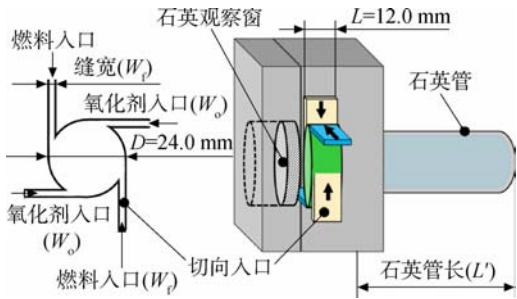


图 1 管状火焰燃烧器结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the tubular flame burner

录火焰外观。燃料和氧化剂缝宽分别为 W_f 和 W_o 。不锈钢结构由内径 $d=24\text{ mm}$ 的圆柱内腔和 4 个长 $L=12\text{ mm}$, 缝宽 $W_f=W_o=0.5\text{ mm}$ 的均布切向入口组成, 石英管内径为 24 mm , 外径为 28 mm , 长度 $L'=75\text{ mm}$ 。为了说明燃烧器的旋流强度, 引入旋回数 $S_w^{[21,25]}$, 针对急速混合管状火焰燃烧模型, 其定义式如下:

$$S_w = (\pi \cdot D_e \cdot D_0) / (4A_t) \quad (1)$$

式中 D_0 为燃烧器直径, D_e 为燃烧器入口喉部直径 ($D_e = D_0 - W_o - W_f$), A_t 为切向入口的总面积。经计算, 该燃烧器的旋回数为 18.4。

切向入口喉部的横截面如图 1 左所示, 燃料通过两个垂直分布的燃料入口 (W_f), 氧化剂通过两个水平分布的氧化剂入口 (W_o) 注入柱形燃烧室内。根据燃料与氧气入口速度差异各自通入适量的稀释剂, 使各入口流速尽量保持一致。由于入口面积和尺寸一致, 因此只要确保流量一致即可。预混燃烧时, 将燃料、氧气与稀释剂充分混合后均匀通入 4 个入口。

稀释剂为 CO_2 时, 燃料侧和氧化剂侧 CO_2 流量分别记为 $q_{V,f\text{CO}_2}$ 和 $q_{V,o\text{CO}_2}$, 氧气体积流量记为 $q_{V,o\text{O}_2}$, 丙烷流量记为 $q_{V,f\text{C}_3\text{H}_8}$, 燃料侧和氧化剂侧总流量分别记为 $q_{V,f}$ 和 $q_{V,o}$ 。急速混合燃烧中, 当量比 Φ 为假定完全混合的全局当量比, 氧气摩尔分数 x_{O_2} 为所有稀释剂与氧气所组成的假定混合气中氧气所占的摩尔分数, 如式(2)所示

$$\begin{cases} \Phi = 5q_{V,f\text{C}_3\text{H}_8} / q_{V,o\text{O}_2} \\ x_{\text{O}_2} = q_{V,o\text{O}_2} / (q_{V,o\text{O}_2} + q_{V,o\text{CO}_2} + q_{V,f\text{CO}_2}) \end{cases} \quad (2)$$

当氧化剂和燃料入口流量一致, 可得

$$q_{V,o\text{O}_2} + q_{V,o\text{CO}_2} = q_{V,f\text{C}_3\text{H}_8} + q_{V,f\text{CO}_2} \quad (3)$$

由式(2)及式(3)变换可得

$$\begin{cases} q_{V,o\text{CO}_2} = q_{V,o\text{O}_2} \times (1/2x_{\text{O}_2} + \Phi/10 - 1) \\ q_{V,f\text{C}_3\text{H}_8} = \Phi q_{V,o\text{O}_2} / 5 \\ q_{V,f\text{CO}_2} = q_{V,o\text{O}_2} \times (1/2x_{\text{O}_2} - \Phi/10) \end{cases} \quad (4)$$

式中各流量均为非负数, 即 $q_{V,o\text{CO}_2} \geq 0, q_{V,f\text{CO}_2} \geq 0$ 。在燃料与氧气恰好完全反应时, 将 $\Phi=1.0$ 代入(4)式, 则 $x_{\text{O}_2} \leq 0.56$ 。也就是说当氧气摩尔分数小于等于 0.56 时, 才确保燃料与氧化剂入口速度相等, 这是由于丙烷与氧气完全燃烧的摩尔比为 1:5, 而燃料和氧化剂侧切向入口面积比为 1:1。当氧气摩尔分数超过 0.56 时, 即使将稀释剂全部通入燃料入口, 燃料入口速度仍小于氧化剂入口速度。因此, 在 $x_{\text{O}_2} \geq 0.56$ 的实验中, 燃料

入口同时通有丙烷和稀释剂, 而氧化剂入口仅通氧气。随着氧气摩尔分数增加到 1.0, 燃料入口稀释剂流量逐渐减小至零, 这导致燃料与氧化剂的入口流速差异不断扩大。

1.2 实验系统

实验系统组成如图 2 所示。使用浮子流量计调节丙烷、氧气和稀释剂的流量, 将气体按要求通入燃烧器, 点火后, 通过后侧的相机 A 记录观察窗火焰特征, 相机 B 记录侧面火焰特征。高氧气摩尔分数时火焰结构变化迅速, 普通相机不能较好地捕捉火焰外观, 因此采用了 VRI(Vision Research Incorporation)公司生产的 Phantom v7.3 高速相机进行观察, 设置帧率为 5000 帧/s。同时使用声压采集系统记录声压脉动, 声压传感器为 BSWA TECH(声望声电)公司生产的 MPA416 型传感器(最大量程为 130 dB, 灵敏度为 49.5 mV/Pa), 传感器布置于燃烧器出口 50 cm 处, 正对于石英玻璃管口, 采集卡型号为 NI 9233, 采样频率为 50 kHz, 使用基于计算机的 LabVIEW 程序采集声压数据。

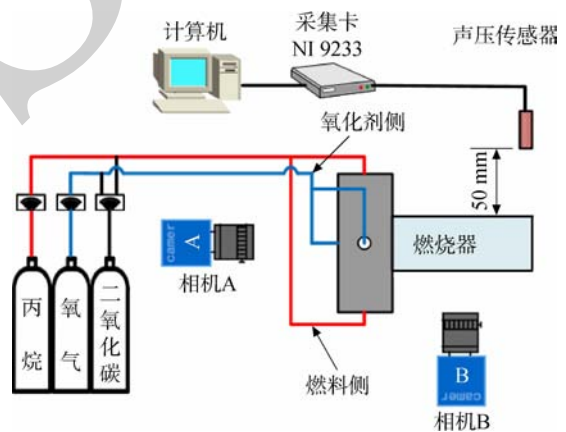


图 2 实验系统图

Fig. 2 Diagram of experiment system

2 结果和分析

2.1 丙烷/空气

为了考察急速混合燃烧的实际效果, 以 N_2 为稀释剂, 氧气摩尔分数为 0.21(即丙烷空气燃烧), 开展了急速混合和预混燃烧的对比实验。急速混合燃烧将 N_2 同时通入燃料和氧化剂入口, 保证各入口流速一致; 预混燃烧将 $\text{N}_2/\text{O}_2/\text{C}_3\text{H}_8$ 充分混合后同时均匀通入各个入口。实验分别选取了富燃、化学计量当量比及贫燃 3 组代表性的预混和急速混合火焰外观, 当量比分别为 $\Phi =$

1.2、1.0 和 0.8,火焰结构如图 3 所示。

图 3(a)和图 3(b)分别为预混和急速混合燃烧的火焰外观图,左侧为由观察窗获得的火焰锋面图,白色虚线圆表示燃烧器内壁面,右侧为下游火焰结构侧视图, q_v 表示总流量。图 3(a)预混燃烧中,左侧火焰图中明亮的环形反应区为火焰前锋,其内部为高温燃气,外部是未燃气体;右侧石英玻璃管内火焰均匀稳定,为稳定的层流管状火焰。当量比 $\Phi=1.2$ 时,燃料过量,火焰呈蓝绿色。降低 Φ 至 1.0,左侧的火焰直径略增加,这是因为火焰锋面总是稳定在层流燃烧速度与未燃气体径向速度相平衡的位置,而 $\Phi=1.0$ 的火焰层流燃烧速度最大,因而火焰直径最大,且下游为均匀明亮的蓝色火焰;进一步降低 Φ 至 0.8,火焰呈淡蓝色,且火焰直径和亮度较 $\Phi=1.0$ 的略小。

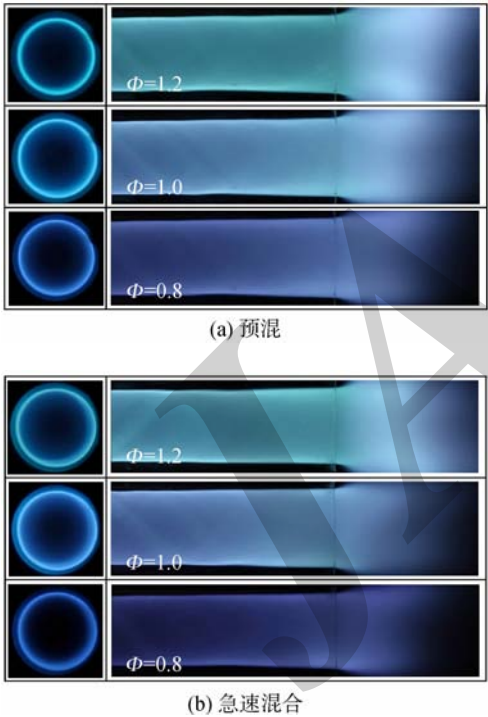


图 3 N_2 稀释的预混与急速混合火焰外观
($x_{O_2} = 0.21, q_{v,f} = q_{v,o} = 3\text{ m}^3/\text{h}$)

Fig. 3 Flame appearances of premixed and rapidly mixed combustion diluted by N_2
($x_{O_2} = 0.21, q_{v,f} = q_{v,o} = 3\text{ m}^3/\text{h}$)

不同当量比下,图 3(b)急速混合的火焰锋面及下游火焰外观与图 3(a)基本一致,均获得了均匀稳定的层流火焰,这说明无回火危险的急速混合管状火焰燃烧能达到预混燃烧相同的效果。

其次,为了进一步研究丙烷管状火焰特性,分析了不同流量下的丙烷燃烧范围,燃烧范围变化

趋势如图 4 所示。图中燃烧下限为贫燃熄灭时的当量比,燃烧上限为维持管状火焰的最高当量比。以 N_2 为稀释剂,对总流量 q_v 由 $2\text{ m}^3/\text{h}$ 增加至 $6\text{ m}^3/\text{h}$,切向入口平均速度 V_s 由从 23 m/s 逐步增加至 69 m/s 。其中 PM 表示预混 (premixed), RM 表示急速混合燃烧 (rapidly mixed)。结果显示两种燃烧方式的可燃上限相近且随流量变化较小,稳定在当量比为 2.5 左右;而燃烧下限随着流量增加而略微增加,从流量为 $2\text{ m}^3/\text{h}$ 的燃烧下限 $\Phi_{\text{floor}}=0.5$ 上升到流量为 $6\text{ m}^3/\text{h}$ 的 $\Phi_{\text{floor}}=0.7$,这主要是因为流量的增加导致旋流的卷吸作用增强,从外界卷吸进更多的空气 ($q_{v,\text{air-e}}$) 参与燃烧,而计算下限值时只考虑了流经流量计的空气流量 ($q_{v,\text{air-a}}$),并未考虑卷吸空气流量,导致图 4 中采用式(5)计算的值 Φ_{cal} 大于实际当量比 Φ_{real} (式(6))

$$\Phi_{\text{cal}} = 5 \times q_{v,\text{fuel}} / q_{v,\text{air-a}} \tag{5}$$

$$\Phi_{\text{real}} = 5 \times q_{v,\text{fuel}} / (q_{v,\text{air-a}} + q_{v,\text{air-e}}) \tag{6}$$

式中 $q_{v,\text{fuel}}$ 和 $q_{v,\text{air-a}}$ 分别为从气瓶经流量计通入燃烧室的燃料和空气的体积流量, $q_{v,\text{air-e}}$ 为从环境中卷吸入燃烧室的空气流量。随着 $q_{v,\text{fuel}}$ 和 $q_{v,\text{air-a}}$ 增加,卷吸作用的增强, $q_{v,\text{air-e}}$ 增加,计算所得当量比 Φ_{cal} 逐步增大。

图 4 中,预混与急速混合的燃烧范围非常接近,进一步说明该燃烧器中急速混合燃烧的具有良好的燃烧特性。后续实验采用的流量均为 $q_{v,f} = q_{v,o} = 3\text{ m}^3/\text{h}$ 。

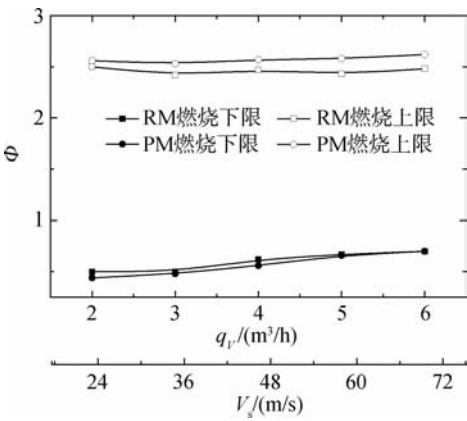


图 4 N_2 稀释下不同流量的燃烧范围 ($x_{O_2} = 0.21$)

Fig. 4 Combustion range under different volume flow rates diluted by N_2 ($x_{O_2} = 0.21$)

2.2 丙烷富氧纯氧实验

为了减少 NO_x 的生成,采用 CO_2 作为稀释剂,其燃烧产物主要为 CO_2 和 H_2O ,使得 CO_2 捕

获封存效率大大提高,同时捕获得到的 CO_2 可作为稀释剂再次使用,实现节能减排的目的。为了验证 CO_2 稀释丙烷燃烧的效果,首先对氧气摩尔分数 $x_{\text{O}_2}=0.21$,当量比 $\Phi=1.2$ 的工况进行了实验,火焰结构如图 5 所示。 $x_{\text{O}_2}=0.21$ 时,燃烧下限接近 $\Phi=1.2$,当量比为 1 时未能燃烧。与图 3 中 N_2 稀释的火焰结构相比, CO_2 为稀释剂的火焰直径比 N_2 稀释的稍小,发光强度减弱,火焰变为蓝色。这主要由以下 3 方面所致:① CO_2 较高的比定压热容和较强的辐射放热,使火焰温度降低,层流燃烧随之减小;② CO_2 直接参与了化学反应,在基元反应 $\text{H}+\text{O}_2+\text{M}\leftrightarrow\text{HO}_2+\text{M}$ 中, CO_2 的三体反应 (three-body reaction) 效率约为 N_2 的 3 倍^[26];③ CO_2 通过参与 $\text{CO}+\text{OH}\leftrightarrow\text{CO}_2+\text{H}$ 的反应,抑制了反应进程,产生了 CO ,降低了层流燃烧速度和火焰温度,使可燃范围变窄^[27]。



图 5 急速混合丙烷富氧燃烧($x_{\text{O}_2}=0.21$)

Fig. 5 Oxy-fuel combustion of rapidly mixed propane ($x_{\text{O}_2}=0.21$)

此外,本文基于 Curran 研究组提出的燃烧化学反应机理^[28],利用 CHEMKIN 软件^[29] 计算了一维绝热无拉伸的层流火焰绝热温度和燃烧速度。 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{空气}$ 在 $\Phi=1.0$ 时,火焰绝热温度为 2266 K,层流燃烧速度为 39.0 cm/s,计算所得层流燃烧速度与 Metghalchi 等^[30] 的实验测量结果一致。 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{O}_2/\text{CO}_2$ 在相同条件下绝热温度和层流燃烧速度分别为 1790 K 和 4.83 cm/s,远低于丙烷空气值。当后者的氧气摩尔分数 x_{O_2} 增加至 0.33,在 $\Phi=1.0$ 时,火焰温度达到 2279 K,与 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{空气}$ 的相近,而层流燃烧速度为 26.6 cm/s,仍低于 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{空气}$ 层流燃烧速度,其火焰外观如图 6 所示,图中还给出了当量比为 1.2 和 0.8 的火焰结构图。与图 3(b)相比,由于对应的层流燃烧速度相对较小, CO_2 稀释的火焰直径有所减小;受 CO_2 参与化学反应的影响,当量比为 1.2 的火焰与 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{空气}$ 的蓝绿色火焰不同。

为了研究更高氧气摩尔分数的丙烷燃烧特性,研究了 $x_{\text{O}_2}=0.3,0.4,0.5$,当量比 $\Phi=1.0$ 的急速混合燃烧。火焰外观如图 7 所示。根据火焰外观可得:火焰直径随着氧气摩尔分数增加而增

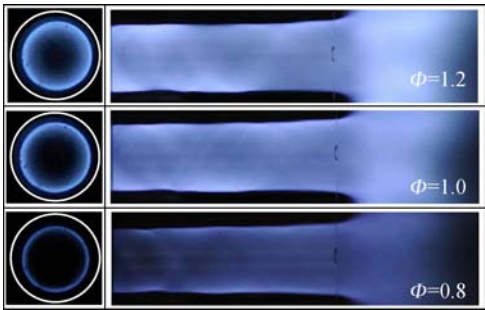


图 6 急速混合丙烷富氧燃烧($x_{\text{O}_2}=0.33$)

Fig. 6 Oxy-fuel combustion of rapidly mixed propane ($x_{\text{O}_2}=0.33$)

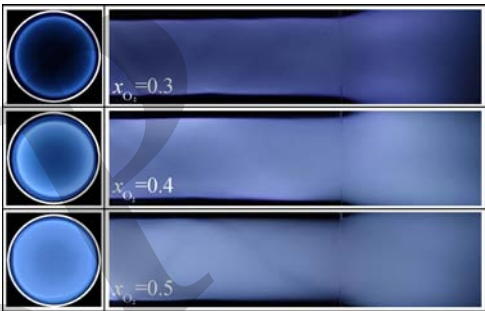


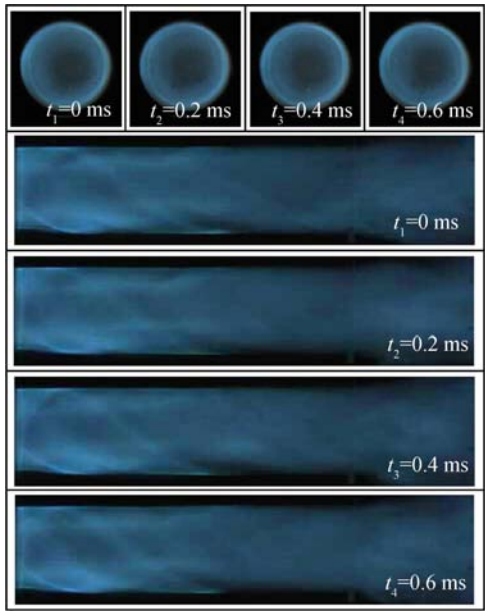
图 7 不同氧气摩尔分数的丙烷富氧火焰结构 ($x_{\text{O}_2}=0.3\sim0.5,\Phi=1.0$)

Fig. 7 Flame structures under various oxygen mole fraction ($x_{\text{O}_2}=0.3\sim0.5,\Phi=1.0$)

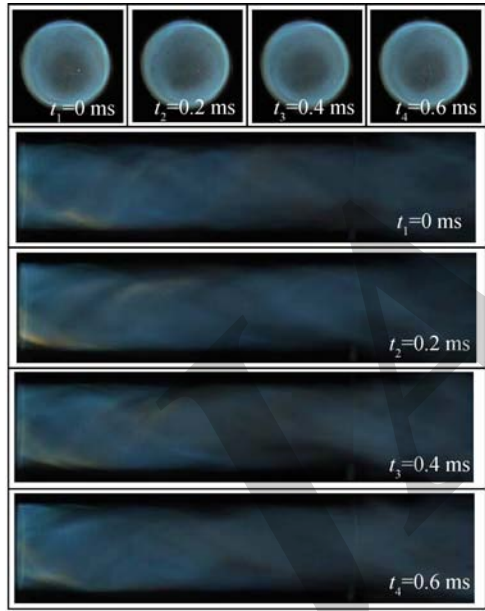
大,火焰锋面逐步向内壁面靠近;随 x_{O_2} 增加,火焰强度明显增加,火焰带变厚。可见, $x_{\text{O}_2}\leq 0.5$ 时,可获得均匀稳定的管状层流燃烧。

当量比为 1.0, $x_{\text{O}_2}=0.6$ 和 $x_{\text{O}_2}=0.7$ 的高速摄影火焰时序图如图 8 所示,图中 t_i 表示时刻,每幅图时间间隔为 0.2 ms,观察窗图像排在火焰侧视图上方。图 8(a)为 $x_{\text{O}_2}=0.6$ 的火焰结构,从观察窗图像看,在靠近壁面处形成了环形火焰带,从侧视图看,火焰有明显的明暗条纹,火焰不是很均匀,但火焰轮廓几乎不变,仍然稳定。图 8(b)为 $x_{\text{O}_2}=0.7$ 的高速摄影图像,观察窗图像中火焰带不再均匀,侧视图中火焰轮廓随时间推移而变化,并伴有少量碳烟和较强噪声,表明此时出现了不稳定燃烧的迹象。

图 9 为 $x_{\text{O}_2}=1.0$ 的火焰结构,图中 F 标记处为燃料入口。通过石英玻璃观察窗发现,在燃料及氧气的出口附近出现了发光强度较强的火焰区。在该火焰带中燃料与氧气尚未充分混合,在各个出口形成了类似于扩散火焰的反应带,阻止了燃料与氧气的进一步混合,从而未能获得稳定的管状火焰。侧视图中出现了明暗条纹,其随时



(a) $x_{O_2}=0.6$



(b) $x_{O_2}=0.7$

图 8 $x_{O_2}=0.6$ 与 $x_{O_2}=0.7$ 的火焰结构高速摄影图
(5000 帧/s, $\Phi=1.0$)

Fig. 8 Flame structures of $x_{O_2}=0.6$ and $x_{O_2}=0.7$
recorded by a high speed video camera
(5000 frame/s, $\Phi=1.0$)

间不规则变化,并在燃烧室内和出口处形成了螺旋状的黄色火焰区,即碳烟区。石保禄等^[24]在甲烷纯氧燃烧实验中发现,由于燃料出口扩散火焰的形成及其周期性变化,导致了强烈的不稳定燃烧现象。

Shimokuri 等^[31]分析了大尺寸管状火焰空气燃烧的不稳定特性,并提出轴向、周向和径向 3 个

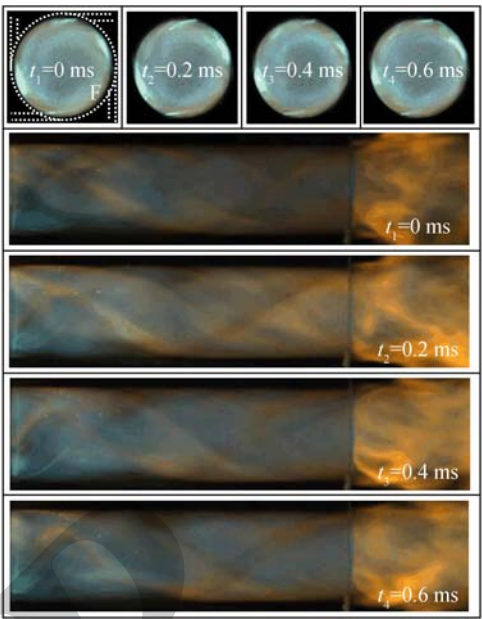


图 9 纯氧火焰高速摄影图
(5000 帧/s, $x_{O_2}=1.0, \Phi=1.0$)

Fig. 9 Pure oxygen flame recorded by a high speed video camera (5000 frame/s, $x_{O_2}=1.0, \Phi=1.0$)

方向的声学共振是诱发不稳定燃烧的机理。而高氧气摩尔分数下的不稳定燃烧机理较为复杂,涉及燃料掺混、流场、热释放率等诸多因素,关于其形成机理将在后续研究中进行深入分析。

2.3 稳定燃烧范围

除火焰结构外,实验分析了富氧条件的燃烧稳定性。针对某一氧气摩尔分数进行了不同当量比的急速混合实验。实验时为了便于调整,稀释剂与氧气的通入量和通入方式均与前文中 $\Phi=1.0$ 的一致(式(4)),仅通过改变丙烷流量改变 Φ ,总流量会发生微小变化,但由于丙烷与氧气的化学当量为 1 : 5,丙烷流量变化范围较小,对结果影响有限。当氧气摩尔分数低于 0.5 时,在可燃范围内均获得了管状火焰。图 10 所示为 $x_{O_2} \leq 0.4$ 的预混和急速混合燃烧的可燃范围,稀释剂分别为 N_2 和 CO_2 。从混合方式来看,急速混合和预混燃烧的燃烧上下限十分接近;从稀释剂种类来看,同一氧气摩尔分数下, N_2 稀释燃烧的可燃范围比 CO_2 稀释的宽,而且 N_2 能够在 $x_{O_2}=0.125$ 时获得稳定管状火焰,而 CO_2 的最低只能在 $x_{O_2}=0.18$ 处获得,造成这种现象的原因在文章前部分有详细说明。燃烧上限随氧气摩尔分数增加而缓慢增加,而下限则随氧气摩尔分数增加不断降低,即可燃范围随氧气摩尔分数增加而增加。

此外,相同绝热温度下 C_3H_8 /空气与 C_3H_8 /

O_2/CO_2 的燃烧范围十分接近,如图 10 中水平虚线所示, $\text{C}_3\text{H}_8/\text{空气}$ 可燃范围为 $\Phi=0.68\sim 2.48$,而氧气摩尔分数为 0.33 的 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{O}_2/\text{CO}_2$ 的可燃范围为 $\Phi=0.65\sim 2.5$ 。可见,在相同火焰温度下, N_2 与 CO_2 稀释的燃烧极限差异较小,但两者的火焰外观有差异。

当氧气摩尔分数超过 0.7,燃烧稳定性趋于复杂。图 11 所示为 $0.7\leq x_{\text{O}_2}\leq 1.0$ 的不同燃烧区域。同一氧气摩尔分数时,随当量比增加燃烧由稳定管状火焰区演化为多个振荡燃烧区。图中,■表示燃烧下限,○表示振荡区域 A 的上下限,▲表示强振荡区域 C 的下限,区域 A 与 C 之间为弱振荡区域 B。可以看出,熄灭下限仍然随 x_{O_2} 增加而降低;当 $x_{\text{O}_2}=0.7$ 时,在当量比为 0.6~0.8 附近出现振荡区域 A,这段区域中声压幅值相近,这在后文有详细叙述;当 $\Phi>0.8$,声压幅有所减小,但仍在振荡,这片区域定义为弱振荡区 B;当 $x_{\text{O}_2}=0.8$ 时,弱振荡区 B 之上出现强振荡区 C,

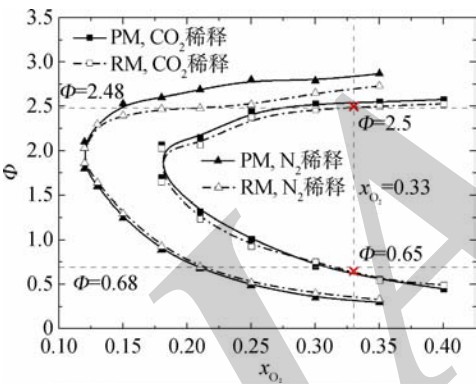
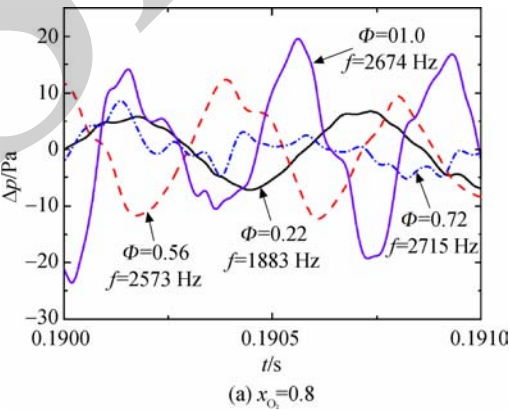


图 10 $x_{\text{O}_2}\leq 0.4$ 时的燃烧范围

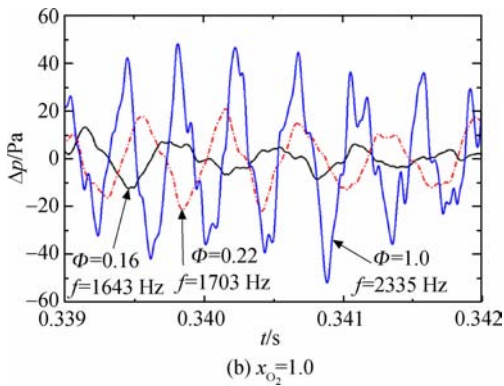
Fig. 10 Combustion range when $x_{\text{O}_2}\leq 0.4$

随着 x_{O_2} 继续增加,弱振荡区 B 变窄,直到 $x_{\text{O}_2}=1.0$ 时消失。从整体来看,振荡区域 A 随 x_{O_2} 增加逐渐下移,强振荡区 C 下限也随之下移,且强振荡区 C 的占比不断增加,这说明振荡越来越容易发生,而且声压实验的结果显示,振荡强度也不断增加。在 $x_{\text{O}_2}=1.0$ 时,稳定燃烧范围非常窄 ($\Phi=0.12\sim 0.17$),且临近燃烧下限,振荡区 A 也变窄 ($\Phi=0.17\sim 0.25$),其余区域都属于强振荡区 C。图 10 为多次实验数据取平均后的结果。

为了进一步说明,在图 11 中氧气浓度为 0.8 和 1.0 处,分别测试了各燃烧区域对应的声压变化,采样点对应的当量比以 * 表示。其声压结果如图 12 所示,其中横坐标为时间 t ,纵坐标为声压变化 Δp 。图 12(a)为 $x_{\text{O}_2}=0.8$ 的声压结果,根据图 12 的区域划分,依次在各区域选取 $\Phi=0.22, 0.56, 0.72$ 和 1.0 的点,代表了 $x_{\text{O}_2}=0.8$ 的 4 种不同的燃烧状态,即稳定-振荡-弱振荡-强振荡(随当量比增加)的一个变化过程,当 $\Delta p\geq 10$ Pa 时,认为振荡发生。从这 4 个声压幅值来看,



(a) $x_{\text{O}_2}=0.8$



(b) $x_{\text{O}_2}=1.0$

图 12 $x_{\text{O}_2}=0.8, 1.0$ 时不同当量比

对应的声压变化(采样频率为 50 kHz)

Fig. 12 Sound pressure at various equivalence ratios with $x_{\text{O}_2}=0.8, 1.0$

(sample frequency of 50 kHz)

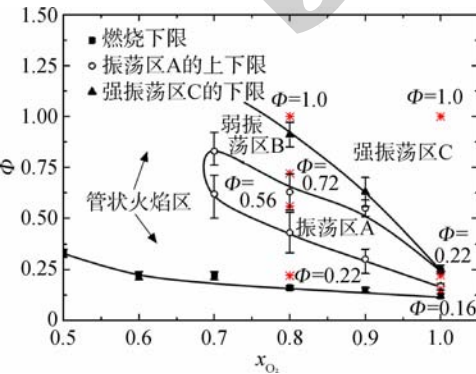


图 11 高氧气摩尔分数下的不同燃烧区

Fig. 11 Various combustion regions under high oxygen mole fraction

$\Phi=0.22$ 声压值大多低于 5 Pa; $\Phi=0.56$ 的声压值普遍超过 10 Pa, 而且波形具有明显的周期性, 认为此时发生振荡; 然而增加到 $\Phi=0.72$ 时, Δp 虽然有个别值超过 10 Pa, 但是大部分介于 $\Phi=0.22 \sim 0.56$ 声压幅值之间, 说明相比于 $\Phi=0.56$, 振荡有所减弱, 但仍有轻微的振荡; $\Phi=1.0$ 时, 幅值迅速增加, 最高达到 40 Pa, 幅值波动较大, 而且有明显的周期性, 属于强烈振荡。

然而, $x_{O_2}=1.0$ 时, 在可燃范围内只有 3 种燃烧状态, 即稳定-振荡-强振荡, 于是对应选取了 $\Phi=0.16, 0.22, 1.0$ 处的声压作为研究对象, 如图 12(b) 所示。在接近燃烧下限的 $\Phi=0.16$ 处, 燃烧处于稳定状态; 而 $\Phi=0.22$ 时, 出现了较强振荡, 幅值比 $x_{O_2}=0.8$ 的大得多, 呈现周期性变化的特征; $\Phi=1.0$ 时, 相比于 $\Phi=0.22$, 幅值进一步增加, 燃烧振荡更强烈。

急速混合管状火焰燃烧器在 $x_{O_2}=0.6$ 处获得了稳定火焰, 而相关学者仅对 $0.23 \leq x_{O_2} \leq 0.4$ 范围内进行了研究。在石保禄等^[24]对甲烷的急速混合实验中, 在 $x_{O_2}=0.86$ 处仍获得了稳定火焰, 这可能是甲烷与丙烷的物理和化学性质差异导致的。通过流场可视化实验还发现, 入口处燃料与氧气的混合时间与入口速度成反比, 且燃料与氧气入口速度相等时混合最佳。由于丙烷与氧气完全反应的体积比为 1:5, 而本次实验的燃料入口和氧化剂入口的面积比为 1:1, 因此只能在 $x_{O_2} \leq 0.56$ 时保证 $\Phi=1.0$ 时的两侧入口流速一致。当 $x_{O_2}=1.0, \Phi=1.0$ 时, 燃料入口流速为 23.15 m/s, 而氧化剂入口流速为 115.75 m/s。因此下一步研究可以从减少混合时间入手, 增加入口速度并尽量使各入口速度接近, 或者增加入口数量。

3 结 论

本文采用无回火危险的急速混合管状火焰燃烧技术, 开展了丙烷富氧燃烧实验研究, 为了加强混合效率, 将 CO_2 同时注入燃料入口和氧化剂入口, 并均衡各入口速度使之尽量一致。主要分析了火焰结构和燃烧稳定性随氧气摩尔分数的变化规律, 具体结论如下:

1) 在燃料与氧化剂入口流速一致时, 丙烷空气急速混合与预混燃烧具有相似的火焰结构, 并在可燃范围内获得了均匀稳定的层流火焰。

2) 以 CO_2 为稀释剂, 氧气摩尔分数 $x_{O_2} \leq 0.5$ 时, 在可燃范围内获得了均匀稳定的管状层

流火焰; $x_{O_2}=0.6$ 时, 当量比 $\Phi=1.0$ 附近火焰不均匀但仍为稳定层流火焰; x_{O_2} 增加至 0.7 时, 仅在低当量比下获得了稳定的管状火焰, 随当量比增加至为 1.0 附近, 出现了不稳定燃烧现象; 将 x_{O_2} 进一步提高, 管状火焰区范围变窄, 不稳定燃烧区范围增大并出现了多个振荡区。

3) 以 N_2 为稀释剂, 在氧气摩尔分数低至 0.125 时丙烷能够燃烧, 而以 CO_2 稀释时, 丙烷可燃的最低氧气摩尔分数为 0.18。

参考文献:

- [1] 北京市环境保护局, 北京市技术监督局. DB11/847-2011 固定式燃气轮机大气污染物排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 1-5.
- [2] FOUST M, THOMSEN D, STICKLES R, et al. Development of the GE aviation low emissions TAPS Combustor for NEXT generation aircraft engines[J]. AIAA-2012-0936, 2012.
- [3] 张弛, 于博文, 杨谦, 等. 弱旋流喷嘴的污染排放和燃烧稳定性分析[J]. 航空动力学报, 2015, 30(11): 2575-2583. ZHANG Chi, YU Bowen, YANG Qian, et al. Analysis of low-swirl injector emissions and combustion stabilization. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(11): 2575-2583. (in Chinese)
- [4] Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. NERSC 2008-2009 annual report[R]. Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-3476E, 2010.
- [5] KUTNE P, KAPADIA B K, MEIER W, et al. Experimental analysis of the combustion behaviour of oxyfuel flames in a gas turbine model combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 3383-3390.
- [6] WALL T F. Combustion processes for carbon capture[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(6): 31-47.
- [7] SUNDKVIST S G, DAHLQUIST A, JANCZEWSKI J, et al. Concept for a combustion system in oxyfuel gas turbine combined cycles[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 136(10): 101513. 1-101513. 12.
- [8] 徐采松, 胡砾元, 罗永浩. 旋流燃烧室内分级进风对燃烧污染物生成的影响[J]. 动力工程学报, 2009, 29(5): 445-450. XU Caisong, HU Liyuan, LUO Yonghao, et al. Effects of staged air injection on combustion pollutant formation in a swirl combustor[J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(5): 445-450. (in Chinese)
- [9] SHEN D, MOST J M, JOULAIN P, et al. The effect of initial conditions for swirl turbulent diffusion flame with a straight-exit burner[J]. Combustion Science and Technology, 2007, 100(1): 203-224.
- [10] BUHRE B J P, ELLIOTT L K, SHENG C D, et al. Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2005, 31

- (4):283-307.
- [11] CHEN L, YONG S Z, GHONIEM A F. Oxy-fuel combustion of pulverized coal: characterization, fundamentals, stabilization and CFD modeling [J]. *Fuel and Energy Abstracts*, 2012, 38(2):14-25.
- [12] SCHÉELE J V. Use of direct flame impingement oxy-fuel [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2009, 36(7):487-490.
- [13] VON SCHÉELE J. Oxyfuel combustion in the steel industry: energy efficiency and decrease of CO₂ emissions [J]. *Energy Efficiency*, 2010, 3:83-102.
- [14] 刘志付, 赵恩录, 张文玲, 等. 玻璃熔窑全氧燃烧技术的开发 [J]. *玻璃*, 2008, 34(2):14-16.
- LIU Zhifu, ZHAO Enlu, ZHANG Wenling, et al. Development of pure oxygen combustion technology in glass furnace [J]. *Glass*, 2008, 34(2):83-102. (in Chinese)
- [15] SEEPANA S, JAYANTI S. Experimental studies of flame extinction in a swirl-stabilized oxy-fuel burner [J]. *Fuel*, 2012, 93(5):75-81.
- [16] SHI B L, JIE H, ISHIZUKA S. Carbon dioxide diluted methane/oxygen combustion in a rapidly mixed tubular flame burner [J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(2):420-430.
- [17] LIU C Y, CHEN G, SIPÖCZ N, et al. Characteristics of oxy-fuel combustion in gas turbines [J]. *Applied Energy*, 2012, 89(1):387-394.
- [18] AMATO A, HUDAK B, D'SOUZA P, et al. Measurements and analysis of CO and O₂ emissions in CH₄/CO₂/O₂ flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2):3399-3405.
- [19] KUTNE P, KAPADIA B K, MEIER W, et al. Experimental analysis of the combustion behaviour of oxyfuel flames in a gas turbine model combustor [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2):3383-3390.
- [20] ISHIZUKA S, MOTODAMARI T, SHIMOKURI D. Rapidly mixed combustion in a tubular flame burner [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(1):1085-1092.
- [21] ISHIZUKA S. On the behavior of premixed flames in a rotating flow field: establishment of tubular flames [J]. *Symposium on Combustion*, 1985, 20(1):287-294.
- [22] ISHIZUKA S. Characteristics of tubular flames [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1993, 19(3):187-226.
- [23] ISHIZUKA S, DUNN-RANKIN D, PITZ R W, et al. *Tubular combustion* [M]. New York: Momentum Press, 2013.
- [24] SHI B L, SHIMOKURI D, ISHIZUKA S. Reexamination on methane/oxygen combustion in a rapidly mixed type tubular flame burner [J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(5):1310-1325.
- [25] SYRED N, BEÉR J M. Combustion in swirling flows: a review [J]. *Combustion and Flame*, 1974, 23(2):143-201.
- [26] MILLER J A, BOWMAN C T. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1989, 15(4):287-338.
- [27] LIU F, GUO H, SMALLWOOD G J. The chemical effect of CO₂ replacement of N₂ in air on the burning velocity of CH₄ and H₂ premixed flames [J]. *Combustion and Flame*, 2003, 133(4):495-497.
- [28] METCALFE W K, BURKE S M, AHMED S S, et al. A hierarchical and comparative kinetic modeling study of C₁-C₂ hydrocarbon and oxygenated fuels [J]. *International Journal of Chemical Kinetics*, 2013, 45(10):638-675.
- [29] Reaction Design Incorporation. *CHEMKIN PRO Release 15101* [R]. San Diego, CA: Reaction Design Incorporation, 2010.
- [30] METGHALCHI M, KECK J C. Laminar burning velocity of propane-air mixtures at high temperature and pressure [J]. *Combustion and Flame*, 1980, 38(2):143-154.
- [31] SHIMOKURI D, SHIRAGA Y, ISHII K, et al. An experimental study on the high frequency oscillatory combustion in tubular flame burners [J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(8):2025-2037.

(编辑:王碧琚)