

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201603132

过贫当量比下贫预混旋流燃烧室点火燃烧特性

邢 畅, 邱朋华, 刘 粟, 陈希叶, 赵文华, 沈闻凯, 吴少华, 秦裕琨

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 为确保贫预混旋流燃烧室能在过贫当量比条件下具有良好的点火性能, 基于不同的点火燃料比, 对贫预混旋流燃烧室在过贫当量比为 0.013~0.502 条件下的点火燃烧特性进行了实验研究. 结果表明: 在点火燃料比为 10 %、15 % 和 20 % 条件下, 贫预混旋流燃烧室能够分别在当量比区间为 0.063~0.251、0.042~0.377 和 0.050~0.502 内成功点火, 并通过实验结果拟合计算出最小点火当量比分别为 0.063、0.039 和 0.011; 而燃烧室在点火燃料比为 5 % 条件下均点火失败; 随着当量比的减小, 由于空气流量的增加而导致燃烧室出口温升逐渐减小, 燃烧室烟气排放中 CH₄ 和 CO 浓度增加, 燃烧效率也随之降低; 虽然燃烧室在高点火燃料比时能够在更贫的当量比条件下点火成功, 但由于过多的空气流量而导致燃烧室燃烧效率降低和污染物排放增多. 保持一定的点火燃料流量对贫预混旋流燃烧室在过贫当量比条件下高效快速启动十分有利.

关键词: 燃气轮机; 贫预混旋流燃烧室; 过贫当量比; 点火过程; 燃烧特性; 点火燃料比

中图分类号: TK16; TK477 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)07-0063-06

Combustion characteristics of ignition processes for lean premixed swirling combustor at ultralow equivalence ratios

XING Chang, QIU Penghua, LIU Li, CHEN Xiye, ZHAO Wenhua, SHEN Wenkai, WU Shaohua, QIN Yukun

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To have good ignition performance of lean premixed swirling combustor (LPSC) at ultralow equivalence ratios, this paper researched experimentally the combustion characteristics of ignition processes for LPSC at the ultralow equivalence ratio conditions of 0.013~0.502 based on different conditions of ignition fuel ratio (F_n). The results indicate that, when $F_2 = 10\%$, $F_3 = 15\%$ and $F_4 = 20\%$, LPSC can ignite successfully at the equivalence ratio intervals of 0.063~0.251, 0.042~0.377 and 0.05~0.502 respectively, and the minimum values of equivalence ratio for ignition process are respectively 0.063, 0.039 and 0.011 by the fitting calculations of experimental results, but LPSC fails to ignite at $F_1 = 5\%$. With decreasing equivalence ratio, the outlet temperature rise has a drop due to the increase of air massflow, which can lead to the rising of CH₄ and CO concentrations and the deceasing of combustion efficiency simultaneously. LPSC can ignite successfully at relatively low equivalence ratio for high F_n , but in which combustion efficiency deceases and pollutant emissions rise because of too much air massflow. Thus, keeping a certain massflow of ignition fuel is beneficial for high-efficiency and rapid startup of LPSC at ultralow equivalence ratio.

Keywords: gas turbine; lean premixed swirling combustor (LPSC); ultralow equivalence ratio; ignition processes; combustion characteristics; ignition fuel ratio

燃烧室点火过程是燃气轮机启动过程中的一个重要环节, 良好的点火性能不仅能在短时间内为燃烧室烟气提供足够温升来进行加速过程, 并且能在较宽的工况区间内可靠点火, 来应对诸如燃烧室加速喘振^[1]等燃气轮机运行问题. 在燃气轮机启动点火时, 燃烧室处于低温低压环境下, 其流场中回流稳燃区

小、对流换热影响大、化学反应慢、燃料释热速率低、燃料雾化效果差等因素^[2-3]将严重影响燃烧室点火燃烧特性. 随着燃气轮机污染物排放要求越来越严格, 贫预混旋流燃烧技术^[4-5]已经成为控制污染物排放的有效途径之一. 但为了保证燃烧室的燃烧性能, 燃烧室主燃区一般仍采用化学当量比设计或相对的富油设计, 这就造成了在燃气轮机启动或慢车状态下燃烧室主燃区更加贫油, 过贫的当量比(β)条件^[6-7]加剧恶化了贫预混旋流燃烧室点火过程中的燃烧稳定性. Lefebvre 等^[8]从燃烧机理出发, 分析了影响燃烧点火的主要控制因素, 并结合实验数据, 给出了在不同当量比($\beta = 0.50 \sim 2.50$)条件下的最小点火能经

收稿日期: 2016-03-28
基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAA11B02); 国家自然科学基金委创新研究群体(51421063)
作者简介: 邢 畅(1987—), 男, 博士研究生;
邱朋华(1973—), 男, 教授, 博士生导师;
吴少华(1952—), 男, 教授, 博士生导师;
秦裕琨(1933—), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士.
通信作者: 刘 粟, liulihit@hit.edu.cn.

验计算公式,以及点火成功需保证的最小吹熄距离经验计算公式. 付镇柏等^[9]通过实验研究了在常压和低压条件下燃烧室当量比分别为 0.15~0.45 和 0.45~0.59 时,旋流器台阶高度对燃烧室点火熄火性能的影响,分析认为台阶高度增加有利于燃烧室贫油点火边界增宽. Ahmed^[10]通过 OH-PLIF 技术,实验研究了对冲射流和钝体两种燃烧室结构在 $\beta = 0.50\sim 0.70$ 条件下,点火成功时的火焰前锋位置和结构,分析了燃烧室流场速度分布、中心和边缘回流区对燃烧室成功点火的影响. Liu 等^[11]通过实验比较了燃料中心分级燃烧室与传统的双旋流器燃烧室在点火和吹熄性能上的优劣,并指出由于燃料雾化性能提升和局部富油区的存在,在相同参考速度条件下,燃料中心分级燃烧室 ($\beta = 0.17\sim 0.26$) 具有更低的点火限制. 薛鑫等^[12]通过实验研究了燃烧室在 $\beta = 0.20\sim 0.54$ 时,火焰筒压力损失对燃烧室点火性能的影响,并对火焰筒内部流场进行了数值模拟,并分析出低压力损失火焰筒能够在更宽的压力降条件点燃. 杨洪磊等^[13]通过数值计算方法研究了火核半径、点火能量以及点火持续时间的耦合作用对燃烧室在 $\beta = 0.40$ 和 0.51 时点火特性的影响,并提出了针对火核半径太小、点火功率不足或者点火持续时间短时所能采取的调整办法. 郑洪涛等^[14]采用 Fluent 模拟了某型燃气轮机燃烧室在 $\beta = 0.29, 0.40$ 和 0.51 时的点火位置及火焰传播过程,并通过逐渐减小火核半径的方法,得到了燃烧室

的最优点火位置、湍流火焰传播速度以及火焰传播特性. Esclapez 等^[15]利用大涡模拟方法,分析了半预混燃烧室 ($\beta = 0.50\sim 1.50$) 中火焰核心在中心回流区和边缘回流区的传播过程对点火成功的影响,并提出了火焰褶皱平均曲率越小越易点火.

虽然国内外学者已对燃烧室点火过程在各种影响因素下的燃烧特性进行了相关研究,但大部分燃烧特性研究仍在较高的燃烧室当量比条件下展开,即 $\beta \geq 0.15$, 因此,面对燃烧室越来越低的当量比设计条件,需要对燃烧室在过贫当量比条件下的点火燃烧特性进行研究.

本研究以采用天然气为燃料的贫预混旋流燃烧室为研究对象,通过实验研究不同点火燃料比条件下,燃烧室在 $\beta = 0.013\sim 0.502$ 内的点火过程,来分析当量比对燃烧室出口温升 (ΔT)、烟气组分浓度 (V_{CH_4} 、 V_{CO} 和 V_{CO_2}) 和燃烧效率 (η) 的影响趋势,并希望为燃气轮机的点火工况设计提供可靠的燃烧特性数据支持.

1 实验装置

1.1 实验系统

本研究在哈尔滨工业大学的微型燃气轮机燃烧室性能实验台上完成,实验台系统流程如图 1 所示.

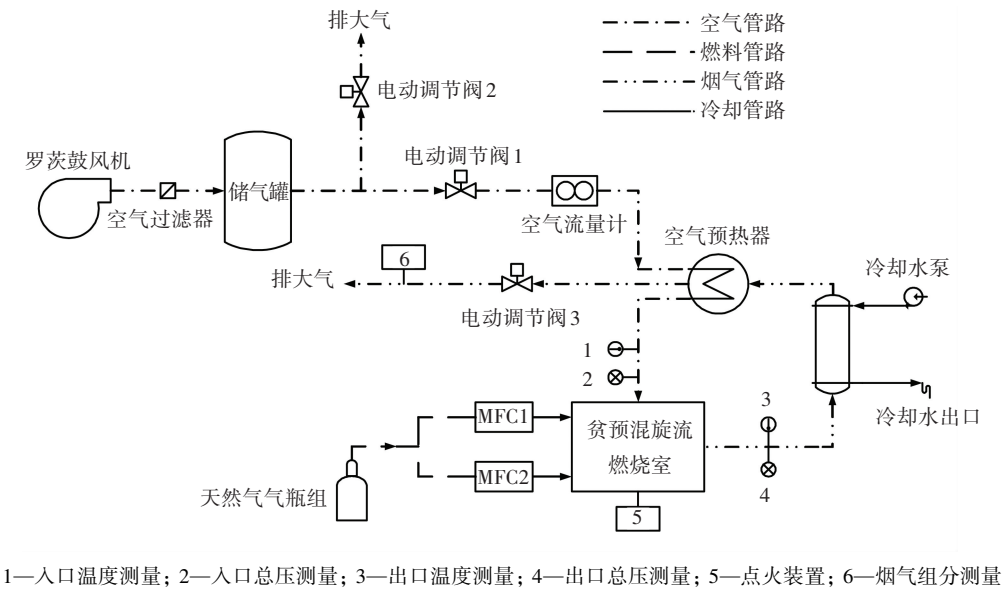


图 1 实验台系统流程图

Fig.1 Flow diagram of experimental platform

空气由罗茨鼓风机提供,在经过空气过滤器、储气罐和空气预热器后进入贫预混旋流燃烧室. 燃烧室入口空气流量主要由电动调节阀 1 和电动调节阀 2 来控制,燃烧室入口空气总压主要由电动调节阀 3

来调节. 燃烧室入口空气温度通过冷却管路改变高温烟气温度来调节. 燃烧室燃料由天然气气瓶组提供. 燃烧室主燃料量和点火燃料量分别由质量流量控制器 MFC1 (Mass flow controller) 和 MFC2 调节,每

根主燃料管支路分别布置有调节阀和流量计,可单独调节每一路主燃料管流量。

为了测量燃烧室进出口温度和总压损失,在燃烧室进出口处分别设置了 K 型热电偶和总压测管,其中在燃烧室出口处设置了 4 根三点热电偶和 4 根三点总压测管,沿燃烧室出口周向每隔 45° 轮流布置,如图 2 所示。每根热电偶和总压测管选择不同的插入深度以测量燃烧室出口截面不同径向位置处的温度和总压。热电偶精度等级为 I 级,压力表和压差计精度分别为满量程的 0.5 % 和 0.3 %。燃烧室烟气组分测量取样点布置在电动调节阀 3 下游,由 GASMET DX-4000 型便携式傅里叶红外多组分气体分析仪在线实时测量烟气中 CH₄、CO 和 CO₂ 的体积分数,浓度测量精度为标定量程的 2 %。

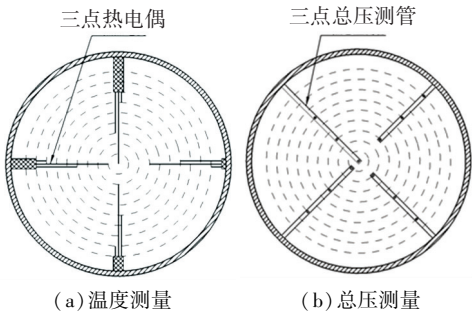


图 2 燃烧室出口测量装置

Fig.2 Outlet measuring equipment of LPSC

1.2 贫预混旋流燃烧室结构

本贫预混旋流燃烧室采用逆流式结构,如图 3 所示。

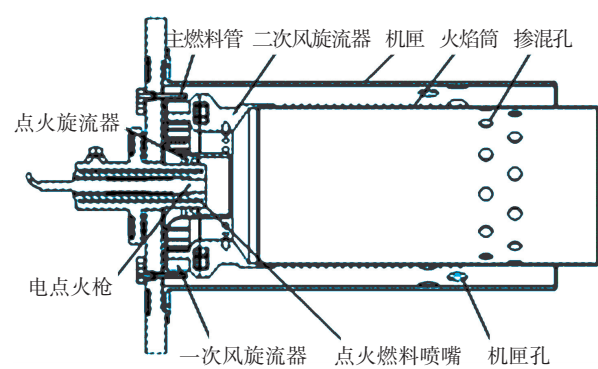


图 3 贫预混旋流燃烧室

Fig.3 Lean premixed swirling combustor

空气由机匣尾部和火焰筒尾部之间的环形面以及机匣孔进入燃烧室,并分别通过一次风旋流器、二次风旋流器、点火旋流器和掺混孔进入火焰筒,其中一次风旋流器为径向叶片式,二次风旋流器为径向斜切孔式,点火旋流器为轴向斜切孔式。为了改善入口空气对火焰筒的冷却效果以及延长火焰筒使用寿命,火焰筒外壁面上布置有冷却肋片。本燃烧室有两种燃料输入方式,即主燃料和点火燃料。其中,主燃料采用预混燃烧方式,由 12 根沿一次风旋流器

均匀布置的主燃料管喷出;点火燃料采用扩散燃烧方式,由点火燃料喷嘴喷出,并被电点火枪点燃。燃烧室设计燃料为天然气,其中甲烷体积分数为 90%。

2 实验方案

2.1 实验方法

本研究定义点火燃料比 (F_n) 为点火燃料量占满负荷时燃料量的比例,空气流量比 (A) 为燃烧室点火时入口空气流量占满负荷时空气流量的比例。不同点火燃料比和空气流量比条件下的当量比如表 1 所示(共计 4 种点火燃料比和 10 种空气流量比)。贫预混旋流燃烧室在点火过程中的主燃料量为零。本研究在不同点火燃料比条件下,通过改变空气流量比,来实验研究不同当量比条件对燃烧室点火过程中燃烧室出口温升、燃烧效率和烟气组分的影响。

表 1 不同点火燃料比和空气流量比条件下的燃烧室当量比
Tab.1 Equivalence ratio of LPSC under different conditions of F_n and A

A	β			
	$F_1 = 5\%$	$F_2 = 10\%$	$F_3 = 15\%$	$F_4 = 20\%$
0.05	0.126	0.251	0.377	0.502
0.10	0.063	0.126	0.188	0.251
0.15	0.042	0.084	0.126	0.167
0.20	0.031	0.063	0.094	0.126
0.25	0.025	0.050	0.075	0.100
0.30	0.021	0.042	0.063	0.084
0.35	0.018	0.036	0.054	0.072
0.40	0.016	0.031	0.047	0.063
0.45	0.014	0.028	0.042	0.056
0.50	0.013	0.025	0.038	0.050

2.2 点火成功判断方法

目前,判断燃烧室是否点火成功的方法大致可分为直接判断法和间接判断法。直接判断法是通过燃烧室观察孔见到稳定的火焰则为点火成功^[11-16];而间接判断法一般是在燃烧室出口设置热电偶,点火时若燃烧室出口温升高于燃烧室快速启动的最低温升 80 K 则为点火成功^[17-18]。由于本贫预混旋流燃烧室结构的逆流进气特点,对燃烧室内火焰的直接观测十分困难,因此本研究选择间接判断法。

2.3 实验条件

在本研究中,燃烧室入口总压为 115 kPa,入口空气温度为 323 K,电点火枪的火花能量为 10 J,其中燃烧室入口空气温度是由罗茨鼓风机对空气加压做功产生。

3 实验结果分析

3.1 当量比对燃烧室出口温升的影响

在不同点火燃料比和当量比条件下,燃烧室出口温升值及其随当量比变化的拟合函数曲线如图 4 所示,图中虚线为燃烧室点火成功和失败的分界线.随着当量比的减小,燃烧室出口温升由于入口空气流量的增加而降低,而随着点火燃料比的减小,由于燃料燃烧释放热量减少而导致了燃烧室出口温升降低.

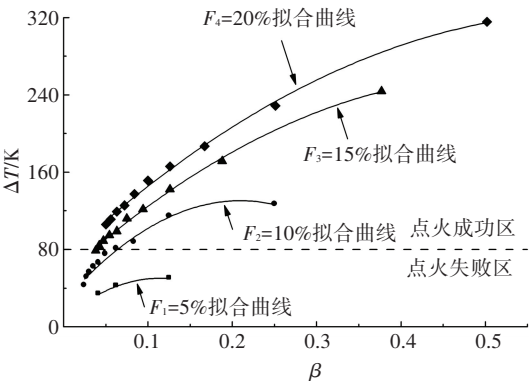


图 4 当量比对燃烧室出口温升的影响

Fig.4 Effects of equivalence ratio on outlet temperature rise

在 $F_1 = 5\%$ 条件下,燃烧室出口温度只在 $\beta = 0.126$ 、 0.063 和 0.042 时出现温升,并且温升均没有达到 80 K ,因此,燃烧室在该条件下点火失败.这是由于点火燃料流量过小,不能产生足够的热量使燃烧室出口温度达到预定值.

在 $F_2 = 10\%$ 、 $F_3 = 15\%$ 和 $F_4 = 20\%$ 条件下,燃烧室分别在当量比区间为 $0.063 \sim 0.251$ 、 $0.042 \sim 0.377$ 和 $0.050 \sim 0.502$ 条件下成功点火 3 次,最高出口温升分别为 126.5 、 243.8 和 315.5 K . 通过对燃烧室出口温升随当量比变化的拟合函数计算,得出在 $F_2 = 10\%$ 、 $F_3 = 15\%$ 和 $F_4 = 20\%$ 条件下的最小点火当量比分别为 0.063 、 0.039 和 0.011 .

3.2 当量比对燃烧效率的影响

燃烧室燃烧效率通过烟气组分分析法^[17] 计算,如式(1)所示:

$$\eta = \frac{V_{\text{CO}_2} + 0.531V_{\text{CO}} - 0.319V_{\text{CH}_4}}{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{CO}} + V_{\text{CH}_4}}. \tag{1}$$

式中: V_{CO_2} 为烟气中 CO_2 的体积分数, $\mu\text{L/L}$; V_{CO} 为烟气中 CO 的体积分数, $\mu\text{L/L}$; V_{CH_4} 为烟气中 CH_4 的体积分数, $\mu\text{L/L}$.

在不同当量比条件下的燃烧室燃烧效率如表 2 所示. 在高当量比条件下,燃烧室出口温升最大,促进了燃料的燃烧反应,燃烧室能够保证完全燃烧.随着燃烧室当量比的减小,燃烧室进口空气量逐渐增多,燃烧室出口温升逐渐降低,燃烧室烟气中出现

CO 和未燃尽的 CH_4 ,燃烧室燃烧效率也随之降低.

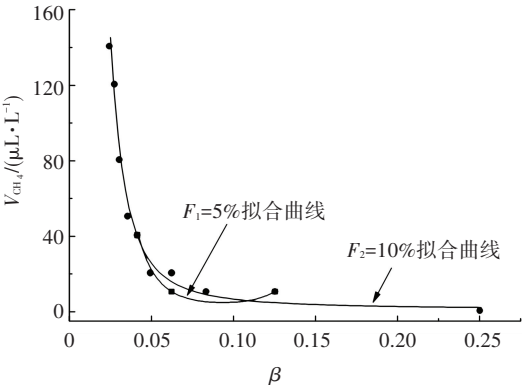
表 2 当量比对燃烧效率的影响

Tab.2 Effect of equivalence ratio on combustion efficiency

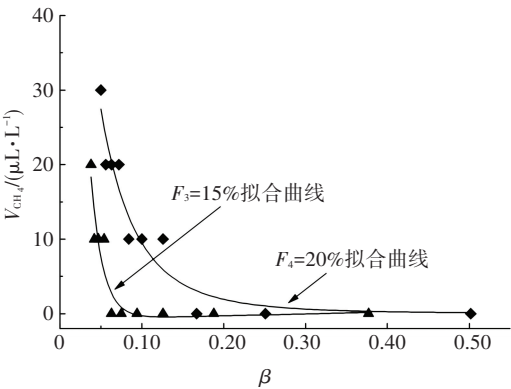
$F_1 = 5\%$		$F_2 = 10\%$		$F_3 = 15\%$		$F_4 = 20\%$	
β	$\eta/\%$	β	$\eta/\%$	β	$\eta/\%$	β	$\eta/\%$
0.126		0.251	99.96	0.377	99.96	0.502	99.95
0.063		0.126	99.76	0.188	99.94	0.251	99.94
0.042		0.084	99.67	0.126	99.92	0.167	99.91
0.031		0.063	99.28	0.094	99.87	0.126	99.72
0.025		0.050		0.075	99.85	0.100	99.66
0.021		0.042		0.063	99.82	0.084	99.57
0.018		0.036		0.054	99.52	0.072	99.32
0.016		0.031		0.047	99.46	0.063	99.24
0.014		0.028		0.042	99.41	0.056	99.15
0.013		0.025		0.038		0.050	98.83

3.3 当量比对烟气组分的影响

在不同点火燃料比和当量比条件下,燃烧室烟气中 CH_4 、 CO 和 CO_2 的体积分数如图 5~图 7 所示.



(a) $F_1 = 5\%$ 和 $F_2 = 10\%$



(b) $F_3 = 15\%$ 和 $F_4 = 20\%$

图 5 当量比对 CH_4 排放量的影响

Fig.5 Effects of equivalence ratio on CH_4 emission

随着当量比的减小,燃烧室烟气中 CH_4 和 CO 浓度增加,而 CO_2 浓度减少.这是由于,在高当量比条件下,燃烧室出口温升最大,促进了燃料的燃烧反应,燃烧室燃烧效率高,导致了燃烧室烟气中的 CH_4

和 CO 浓度最少;而随着燃烧室进口空气量逐渐增多,燃烧室散热速率逐渐增加,燃烧室出口温升变小,燃烧反应变慢,燃烧效率降低,在 CH₄ 浓度增大的同时,由于 CH₄ 的不完全燃烧,CO 浓度逐渐增大,CO₂ 生成量变少.

通过拟合函数方法对燃烧室烟气组分变化趋势进行后处理,即图 5~图 7 中的拟合曲线所示,计算得出了在最小点火当量比条件下的 CH₄、CO 和 CO₂ 的体积分数,如表 3 所示. 通过分析表 3 发现,虽然在高点火燃料比时,燃烧室可以在更低的当量比条件下满足 80 K 的出口温升,但也由于燃烧室出口温升的限制,以及过多的空气流量,导致点火燃料处于不完全燃烧状态,烟气中 CH₄ 和 CO 浓度增加,燃烧效率降低.

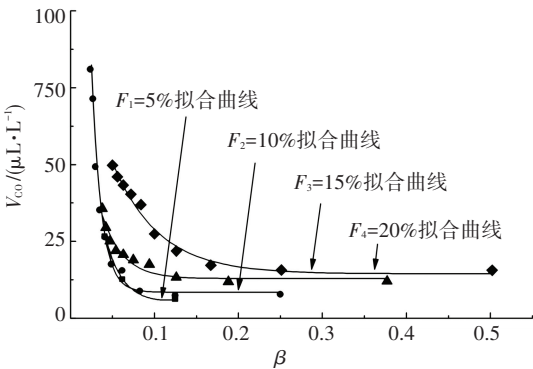


图 6 当量比对 CO 排放量的影响

Fig.6 Effects of equivalence ratio on CO emission

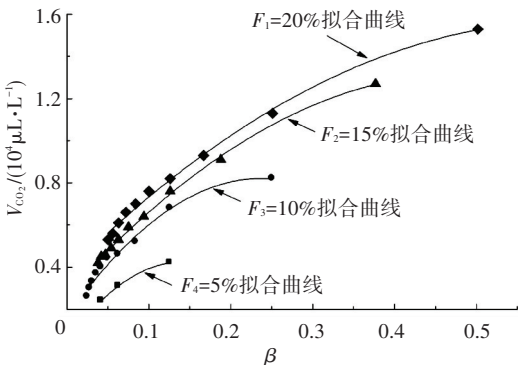


图 7 当量比对 CO₂ 排放量的影响

Fig.7 Effects of equivalence ratio on CO₂ emission

表 3 最小点火当量比条件下的烟气组分及燃烧效率

Tab.3 Exhaust gas component concentration and combustion efficiency under minimum ignition equivalence ratio

燃料比/%	$V_{CH_4} /$ ($\mu L \cdot L^{-1}$)	$V_{CO} /$ ($\mu L \cdot L^{-1}$)	$V_{CO_2} /$ ($\mu L \cdot L^{-1}$)	$\eta / \%$
5				
10	20	15.1	0.46×10^4	99.28
15	17.06	32.57	0.44×10^4	99.15
20	75.21	88.81	0.42×10^4	96.77

因此,应根据燃气轮机启动过程中的空气流量变化情况,在满足燃气轮机高效快速启动的最低温升前提下,适当地调整燃烧室的点火燃料流量,使燃烧室燃烧效率最高,污染物排放最少.

4 结 论

1) 在 $F_2 = 10 \%$ 、 $F_3 = 15 \%$ 和 $F_4 = 20 \%$ 条件下,燃烧室可以在较大的当量比变化区间内成功点火. 当量比区间分别为:0.063 ~ 0.251、0.042 ~ 0.377 和 0.050 ~ 0.502,拟合计算出的燃烧室最小点火当量比分别为 0.063、0.039 和 0.011;在 $F_1 = 5 \%$ 条件下,由于受点火燃料量较少的影响,燃烧室出口温升没有达到预定值,燃烧室点火失败.

2) 在高当量比条件下,燃烧室能够保证完全燃烧. 燃烧效率随燃烧室当量比的减小而降低. 在 $F_2 = 10 \%$ 、 $F_3 = 15 \%$ 和 $F_4 = 20 \%$ 条件下,燃烧室在最小点火当量比条件下的燃烧效率拟合计算结果分别为 99.28 %、99.15 % 和 96.77 %.

3) 在高当量比条件下,燃烧室烟气排放中 CH₄ 和 CO 浓度非常低;随着当量比的减小,燃烧室烟气排放中 CH₄ 和 CO 浓度有增加趋势,而 CO₂ 浓度变小.

致 谢

感谢国家科技支撑计划项目《微型移动式燃气轮机冷热电联供技术及示范》(批准号 2012BAA11B02) 和国家自然科学基金委创新研究群体项目《热辐射传输与流动控制》(批准号 51421063) 对本研究工作的支持.

参考文献

[1] 孙健国,李秋红,杨刚,等. 航空燃气涡轮发动机控制[M]. 上海:上海交通大学出版社,2014.
SUN Jianguo, LI Qiuhong, YANG Gang, et al. Aircraft gas turbine engine control[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2014.

[2] MASTORAKOS E. Ignition of turbulent non-premixed flames[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35(1): 57-97. DOI: 10.1016/j.pecs.2008.07.002.

[3] PHILIP M, BOILEAU M, VICQUELIN R, et al. Large eddy simulations of the ignition sequence of an annular multiple-injector combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3): 3159-3166. DOI: 10.1016/j.proci.2014.07.008.

[4] KOLANOWSKI B F. Guide to microturbine[M]. Lilburn: The Fairmont Press, 2004.

[5] LIEUWEN T C, YANG V. Gas turbine emissions[M]. New York: Cambridge University Press, 2013.

[6] JANSOHN P. Modern gas turbine systems: high efficiency, low emission, fuel flexible power generation[M]. Cambridge: Wood-

head Publishing Limited, 2013.

[7] BENAROUS A, KARMED D, LIAZID A, et al. Numerical simulation of a turbulent partially premixed flame with inhomogeneous equivalence ratio[J]. Fuel, 2014, 124: 57–65. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.01.069.

[8] LEFEBVRE A H, BALLAL D R. Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions[M]. New York: CRC Press, 2010.

[9] 付镇柏,林宇震,傅奇慧,等. 不同台阶高度对中心分级燃烧室点火熄火性能的影响[J]. 航空动力学报, 2014, 29(5): 1062–1070. DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.2014.05.010.

FU Zhenbo, LIN Yuzhen, FU Qihui, et al. Effect of different step heights on ignition and blowout performance of internally-staged combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(5): 1062–1070. DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.2014.05.010.

[10] AHMED S F. The probabilistic nature of ignition of turbulent highly-strained lean premixed methane-air flames for low-emission engines [J]. Fuel, 2014, 134(2014): 97–106. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.05.052.

[11] LIU Fuqiang, ZHANG Kaiyu, MU Yong, et al. Experimental investigation on ignition and lean blow-out performance of a multi-sector centrally staged combustor[J]. Journal of thermal science, 2014, 23(5): 480–485. DOI: 10.1007/s11630-014-0732-4.

[12] 薛鑫,林宇震,张弛,等. 火焰筒压力损失对点火特性的影响[J]. 航空动力学报, 2012, 27(10): 2229–2235. DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.2012.10.030.

XUE Xin, LIN Yuzhen, ZHANG Chi, et al. Effects of liner pressure loss on combustor ignition performances[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(10): 2229–2235. DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.2012.10.030.

[13] 杨洪磊,李雅军,杨仁,等. 燃气轮机燃烧室点火特性[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(1): 60–63. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2015.01.012.

YANG Honglei, LI Yajun, YANG Ren, et al. Research on performance of gas turbine combustor ignition[J]. Ship Science and Technology, 2015, 37(1): 60–63. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2015.01.012.

[14] 郑洪涛,李雅军,蔡林. 燃气轮机燃烧室点火位置及点火过程计算[J]. 热能动力工程, 2014, 29(1): 22–28. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2014.01.010.

ZHENG Hongtao, LI Yajun, CAI Lin. Calculation of the ignition location and process for the combustor of a gas turbine. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power[J]. 2014, 29(1): 22–28. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2014.01.010.

[15] ESCLAPEZ L, RIBER E, CUENOT B. Ignition probability of a partially premixed burner using LES[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3): 3133–3141. DOI: 10.1016/j.proci.2014.07.040.

[16] MACHOVER E, MASTORAKOS E. Spark ignition of annular non-premixed combustors[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 73: 64–70. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2015.09.008.

[17] 航空发动机设计手册总编委会. 航空发动机设计手册-第九册: 主燃烧室[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.

Aircraft gas turbine design handbook-the ninth volume: main combustor[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000.

[18] 林宇震,许全宏,刘高恩,等. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

LIN Yuzhen, XU Quanhong, LIU Gaoen, et al. Gas turbine combustor[M]. Beijing: National Defend Industry Press, 2008.

(编辑 杨 波)

封面图片说明

封面图片来自本期论文“面向数字舞台表演的海龟机器人系统研制”,是哈尔滨工业大学深圳研究生院机电工程与自动化学院研制的海龟机器人系统以及在机器人戏剧《来到深圳的豆芽菜》中的公演现场,海龟机器人在剧中扮演主人公“豆芽菜”(真人演员)姥姥的角色. 海龟机器人的设计采用了仿生技术,由4条3DOF模块化轻型腿、一套具有连续曲率的柔性脖子、龟壳开合装置和碳纤维框架组成. 所有电机、电路板等机电部件安装于躯干中,降低了悬臂部分的尺寸和质量,减轻了电机的负载;采用重心自调整的方法规划运动步态,确保多足运动的稳定性;柔性脖子运动十分灵活,在舞台上可以与观众进行友好互动. 研制的海龟机器人系统质量为6 kg,外形尺寸为810 mm×620 mm×350 mm,头-颈部长度为300 mm,爬行速度为0.35 m/s,负载能力(除自重外)为2 kg,连续工作时间为1 h,无线操作距离为100 m,可以完美地演绎戏剧角色,外形美观,惹人喜爱,表演效果极佳,连续多次公演获得了好评.

(图文提供:黄 亮,管贵森,徐文福,梁国伟.哈尔滨工业大学深圳研究生院机电工程与自动化学院)