

不同钝体宽度下的驻涡燃烧室 排放试验

吴泽俊, 何小民, 金 义, 宋耀宇, 洪 亮, 薛 冲
(南京航空航天大学 能源与动力学院
江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 为了研究空气流量分配对驻涡燃烧室对排放特性的影响,了解对驻涡燃烧室内污染物生成的过程及其影响因素,设计了一个能够改变中心钝体宽度、仅凹腔供油的驻涡燃烧室. 在常压下对该驻涡燃烧室进行了排放特性试验,进口温度保持 200℃. 试验中,燃烧室进口马赫数为 0.15~0.3. 影响排放的因素主要包括雾化质量、凹腔当量比以及与进口马赫数相关的驻留时间等. 总体来说雾化质量、凹腔当量比的提高对降低 CO 和 HC 的排放是有利的,但是这会使 NO_x 排放增加. 在低凹腔当量比时,CO 排放曲线变化下降比较平缓,甚至出现上升趋势,而 HC 排放曲线比较陡峭. 这是由于 HC 的消耗速度比 CO 消耗速度快,随着凹腔当量比的增加,供油压力提高,燃油雾化粒径变小,燃油蒸发时间缩短,使 HC 排放快速减少,中间产物 CO 大量产生而来不及消耗. 凹腔当量比进一步上升时,由于燃烧温度的提高,使得 CO 排放快速减少. 在燃烧室内燃烧过程中,NO_x 的形成和消耗是非常复杂的过程,目前只能作一些定性的分析,而 CO 和 HC 的反应过程相对简单. 通过对不同钝体槽宽下,具有相似凹腔前壁流量的工况的比较,发现 CO 和 HC 的形成主要受凹腔内工作状况影响,而 NO_x 的形成过程更复杂,主流也对其产生着重要的影响.

关 键 词: 驻涡燃烧室; 排放; 空气流量分配; 雾化特性; 湍流强度; 驻留时间

中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A

Experiment on emissions of a trapped vortex combustor with different bluff body widths

WU Ze-jun, HE Xiao-min, JIN Yi, SONG Yao-yu,
HONG Liang, XUE Chong

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To reveal the effects of air flow-rate distribution on emission characteristics of trapped vortex combustor and understand the generating processes of emissions as well as the factors affecting the processes, a trapped vortex combustor with different centric bluff body width was designed. And the combustor was designed to be fueled only in cavity. Emission experiment was conducted at atmospheric pressure. And inlet temperature of the combustor was kept at 200℃. Inlet Mach number varied from 0.15 to 0.3. Atomization quality, cavity equivalence ratio in combustion zone, and inlet Mach number and residence time influenced emissions in combustors. Generally, improvement of atomization quality and increase of cavity equivalence ratio can enhance combustion process and consequently reduce emissions of CO and HC. However, it will also lead to increase of NO_x emission. As cavity equivalence

ratio is relatively lower, CO emission curves decline gradually, and even ascend in some cases. HC emission curves descend rapidly here. This is mainly because the consumption of HC is much faster than CO. When cavity equivalence ratio is increasing, the fueling pressure is elevated and thus atomization is enhanced, so vaporizing time of fuel spray is shortened. This will result in rapid decline of HC emission. Although, a large amount of CO will be produced and there is no enough time to consume. CO emission declines rapidly when cavity equivalence ratio is high enough because of the higher temperature in the combustion zones. In gas turbine combustors, the producing and consuming process of NO_x is very complicated, and there is no enough data to demonstrate it. Comparison between different bluff body widths has been made as the cavity air flow-rate on front wall are similar. And it reveals that the emissions of CO and HC are mainly determined by the cavity condition. However, NO_x emission is also impacted by the mainstream.

Key words: trapped vortex combustor; emissions; air flow rate distribution; atomizing characteristic; turbulence intensity; residence time

在人类发展中,工业技术的不断进步,但是随之而来的是人类生存环境的恶化,特别是能源动力领域化石燃料的燃烧排出的污染物,对地球环境和人体健康产生了极大的危害^[1]. 为了应对这一情况,各国及国际环保组织不断出台新的环保法规^[2-7]. 从全球燃烧污染排放总量来看,航空燃气轮机的排放所占比例是很小的,但是航空燃气轮机的排放具有局部性和高空性的特点^[8]. 因此引起了各国人民和政府的极大关注,国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)和各国民航局都对航空燃气轮机污染物排放作出了严格的规定,制定了相关的标准^[9-10]. 各科研机构、高校、厂商也争相开发低排放燃烧技术和低排放燃烧室. 其中,驻涡燃烧室在低排放性能方面显示出了巨大的潜力.

驻涡燃烧室(trapped vortex combustor, TVC)的概念最初是美国在 1993 年提出来的^[11-13],相对于现有技术,驻涡燃烧室在点火、贫油熄火、空中再点火等方面的性能提高了近 50%;驻涡燃烧室的污染物排放量比国际民航标准 CAEP2 (Committee on Aviation Environmental Protection) 少 40%~60%;驻涡燃烧室能在比传统燃烧室更宽的范围内保持 99% 以上的燃烧效率. 此外,Shouse 还分析了驻涡燃烧室技术在其他方面的优越性^[14]. 他认为驻涡燃烧室能达到以下目标:出口温度比现有燃烧室提高 500 K;质量减少 50%;出口温度分布系数(OTDF)提升到 0.10;生产成本降低 45%;维修成本降低 30%.

在美国能源部(Department of Energy, DOE)的支持下,Straub 等人对用于地面燃气轮

机的 RQL(rich burn-quick quench-lean burn)驻涡燃烧室进行了研究^[15]. 该研究中,驻涡燃烧室主流采用流量分配盘(distribution plate)达到快速淬熄的效果. 采用实验和数值模拟的方面对该模型的排放性能进行了研究,结果表明在较低的凹腔当量比下,数值模拟和实验结果比较吻合,但是在较高的凹腔当量比下,两者得到的 NO_x 排放量差别较大. Straub 认为凹腔内的副涡会将贫油区的氧传输到富油区,这将限制驻涡燃烧室降低 NO_x 排放的能力.

Bucher 等人发展了一种预混预蒸发(clean pre-mixed, pre-vaporized, LPP)驻涡燃烧室^[16],这种燃烧室的 NO_x,CO 和 HC 排放体积分数分别是 9×10^{-6} , 9×10^{-6} , 0, 而且燃烧效率 99.9% 以上. 之后他们进一步对 LPP/ TVC 进行了改进,试验结果显示 NO_x,CO,UHC 排放体积分数是更低的 4×10^{-6} , 4×10^{-6} , 0, NO_x 甚至降低到了 3×10^{-6} ^[17].

以上研究中,针对驻涡燃烧室污染物生成过程的研究并不多. 本文在课题组前期研究工作的基础上^[18-21],通过改变驻涡燃烧室中心钝体宽度使驻涡燃烧室的流量分配发生改变,在仅凹腔供油的情况下,通过试验研究其对污染物排放的影响规律,从而对驻涡燃烧室中污染物生成的过程及影响因素做出更详细的了解.

1 试验模型

图 1 为本文所设计的驻涡燃烧室实物照片. 其结构主要包括扩压器、火焰筒、机匣,其中机匣未在图中显示. 火焰筒中包括帽罩、凹腔、中心钝

体等结构. 在火焰筒壁面上布置了直径为 0.7 mm 的多斜孔, 用来冷却火焰筒壁面. 在火焰筒后半段布置了掺混孔, 以控制出口温度.

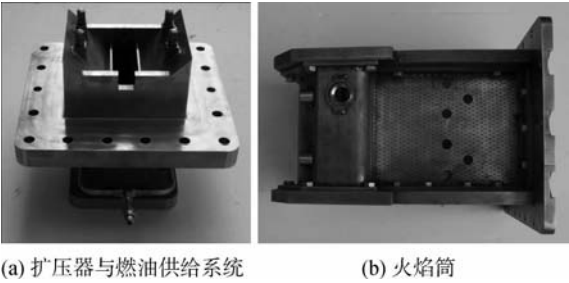


图 1 驻涡燃烧室模型

Fig. 1 Model of trapped vortex combustor (TVC)

火焰筒结构如图 2 所示. 从扩压器进入燃烧室的一部分空气从凹腔前壁进入凹腔内, 与凹腔后壁进入凹腔的空气共同作用形成稳定的涡, 从而稳定火焰. 燃油随空气一起从凹腔前壁进入凹腔, 形成混合良好的可燃混合物. 另一部分空气从中心钝体所形成的通道中进入火焰筒, 即为驻涡燃烧室主流流动, 并与凹腔内已燃混气进行混合, 并进一步反应. 该燃烧室设计为仅在凹腔内供油的结构.

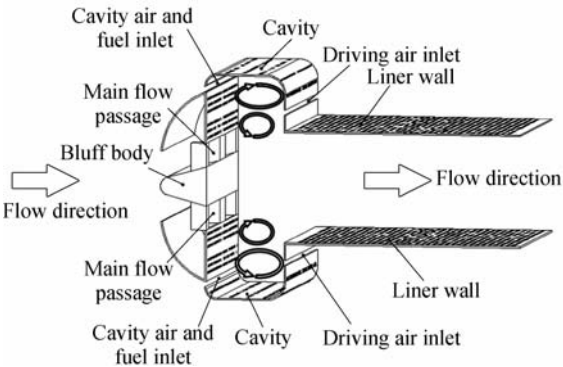


图 2 驻涡燃烧室火焰筒三维结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three-dimensional structure of the TVC liner

上下凹腔分别采用两个离心喷嘴供入燃油. 火花塞安装在上凹底部, 其频率为 8 Hz, 单次释放能量为 12 J.

图 3 为放置于主流中的中心钝体结构示意图. 中心钝体起到稳定火焰、联系两个凹火焰以及调节流量分配的作用. 本文中就是通过改变中心钝体宽度 (如图 3 中的 W), 从而改变燃烧室的流量分配, 进一步研究流量分配对污染物排放的影响. 文中分别考察了 $W = 21, 25, 29, 36$ mm 的排放特性.

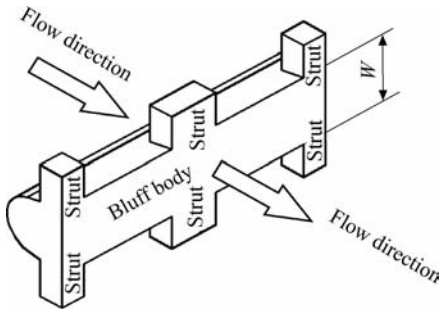


图 3 中心钝体结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of bluff body structure

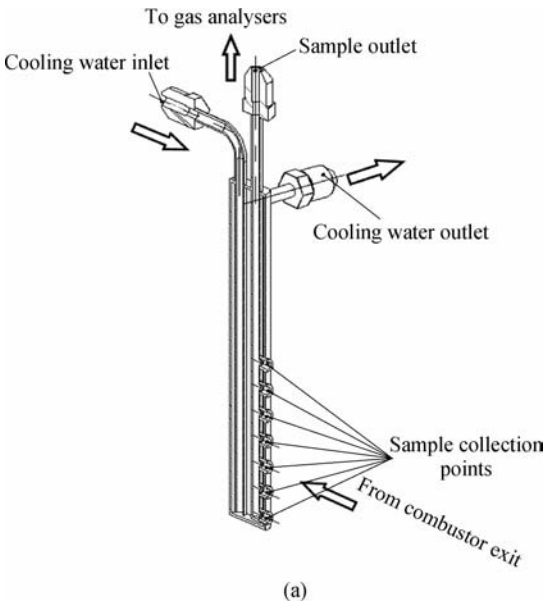
2 试验系统与试验参数

2.1 试验系统

气源由一台体积流量为 $35 \text{ m}^3/\text{min}$ 的螺杆式压气机提供, 并经过稳压罐使燃烧室进口压力稳定. 气路中设置了一台电加热器, 能够将质量流量为 1.2 kg/s (下文中流量均指质量流量) 的空气加热到 250°C .

在驻涡燃烧室出口设置了两个采样耙, 其中一个对应联焰板 (struts, 如图 3 所示) 下游位置, 而另一个对应于两个联焰板之间的位置. 采样耙的结构和采样点位置如图 4 所示. 燃烧室出口高度为 70 mm, 该采样耙在高度方向布置了 7 个样气采集点, 以保证足够的采样精度. 采样耙采用水冷的方式将所采集的样气快速冷却, 以冻结化学反应, 保证能够准确燃烧室排气成分. 图 4(b) 中 H_{cavity} 为凹腔深度, W' 为中心钝体与联焰板的总宽度, H_{exit} 为燃烧室出口高度.

样气进入放置在燃烧室出口、采用水冷却的



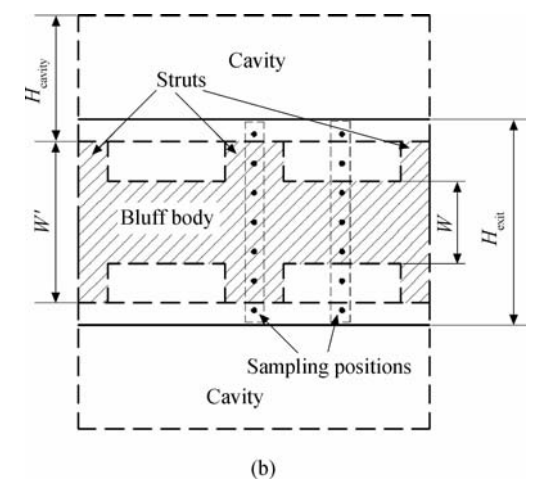


图 4 采样耙与采样点位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sampling rake and sampling positions

采样耙后,一部分经过保持在 160℃ 的电热保温管,然后进入总碳氢(HC)分析仪分析 HC 体积分数;另一部分样气经过保持在 65℃ 的电热保温管中,然后进入分析仪器,分别分析 NO_x,CO,CO₂,CH₄ 及 O₂ 的体积分数.图 5 为样气采集与分析系统示意图.

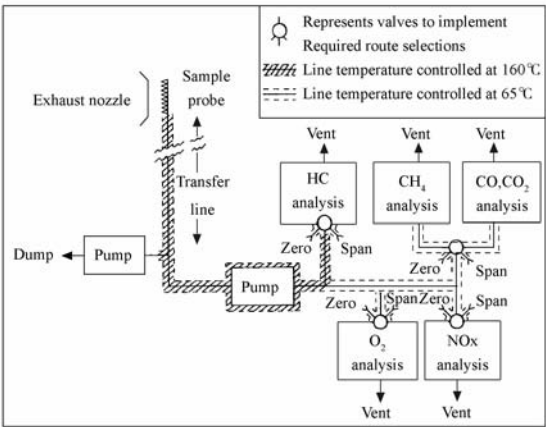


图 5 样气采集及测量系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of sample collecting and measuring systems

试验中采用西门子(SIEMENS)公司的 FID-MAT6 总碳氢分析仪分析 HC 的体积分数,该仪器的测量原理是基于火焰离子检测(FID),最小测量精度可达 0.1×10^{-6} .当碳氢化合物在一种氢气火焰中燃烧时,便会有电子释放出来,这些电子通过一个电场转换成电流.电流强度随着电子数目而增加,通过测量所得的电流便可测得碳原子的数目.

NO_x,CO,CO₂,O₂,CH₄ 体积分数则是采用 SIEMENS 公司的 ULTRAMAT23 红外吸收气体和氧气分析仪来测定.该仪器包含一个被加热到 600℃ 的红外光源发出红外辐射,和一个充满了待测样气组分的检测器组成.红外辐射被样气层吸收后会使得压差增加,从而产生一个流量通过毛细管孔.微流量传感器测得这个流量并产生一个相应的信号.氧气传感器根据燃料电池的工作原理,氧气在阴极与电解液的分界面被转换成电流,而且所产生的电流与氧气的体积分数成正比.NO_x 测量精度为 0.5×10^{-6} ,CO 测量精度为 10×10^{-6} ,CO₂ 测量精度为 0.2%,CH₄ 测量精度为 50×10^{-6} ,O₂ 测量精度为 0.05%.

2.2 试验方法与试验参数

试验在常压下进行,空气被电加热器加热,在驻涡燃烧室进口保持 200℃.在不同的钝体尺寸下,分别通过改变驻涡燃烧室进口条件和燃油量从而改变燃烧室的工作状态,在不同的状态下对驻涡燃烧室出口组分进行采集和分析,确定驻涡燃烧室出口污染物浓度.试验状态如表 1 所示.其中 T_3 为燃烧室进口温度, Ma_3 为燃烧室进口马赫数, $\Phi_{overall}$ 为燃烧室总当量比.

表 1 试验参数

Table 1 Operating parameters

参数	数值
$t/^\circ\text{C}$	200
Ma_3	0.15 0.2 0.3
$\Phi_{overall}$	0.08~0.4

试验中改变了中心钝体宽度,即改变了主流流道的流通面积,从而改变了整个燃烧室的流量分配.不同钝体尺寸下的流量分配见表 2,其中各部分的流量均以所占燃烧室进口总流量的百分比计算.凹腔当量比 Φ_{cavity} 是以凹腔前壁进气口的流量(文中简称凹腔前壁流量)和凹腔供油量所计算的.

表 2 空气流量分配

Table 2 Air flow rate distribution

参数	中心钝体宽度 W/mm			
	21	25	29	36
主流流量/%	58.9	53.3	47.7	37.9
凹腔前壁流量/%	15.2	16.4	17.1	19.1

试验中所测得的所有排放数据均根据国际民航组织的规定换算排放指数为 EI(emission index, EI, 量符号记为 I_e)。

3 试验结果及讨论

试验在常压下进行,进口空气温度为 200℃,在不同进口马赫数 Ma 及燃烧室总当量比下,研究了由于驻涡燃烧室中心钝体的宽度变化引起的流量分配的变化对驻涡燃烧室排放特性的影响规律。试验中所有状态均只在凹腔内供油。

图 6~图 9 为在不同驻涡燃烧室中心钝体宽度下的 CO, HC, NOx 排放量,其横坐标均为根据各自中心钝体尺寸下的流量分配计算所得到的凹腔当量比(Φ_{cavity})。

驻涡燃烧室中心钝体宽度 $W=21\text{ mm}$ 时的排放量如图 6 所示。从图中可以看出,在不同进口空气速度(马赫数 Ma)下,随着凹腔当量比的增加 CO 和 HC 排放总体趋势是减少的,而 NOx 的排放量是逐渐增加的。这主要取决于两个方面的因素:一方面随着凹腔当量比(燃烧室总当量比)增加,燃油供给量增加,因此必须提高供油压力,而采用离心喷嘴的燃油雾化粒径与供油压力密切相关,即供油压力越高,雾化粒径越小,这样就越有利于燃烧,因此,CO 和 HC 排放量均随着凹腔当量比的增加而减少,而 NOx 排放量则会增加;另一方面,随着凹腔当量比的增加,燃烧区平均温

度会提高,从而加速 CO 和 HC 的消耗以及 NOx 的生成,因此,CO 和 HC 排放量减少,而 NOx 排放量增加。

对于 CO 排放,当 $Ma=0.3$ 时, $I_e(\text{CO})$ 值最高,这是由于在相同的燃烧室进口温度下,进口马赫数较高时,相应的空气流动速度也高,燃烧室内的驻留时间短,从而使 CO 消耗速度减慢,造成较高的 CO 排放。另外, $Ma=0.15$ 和 $Ma=0.2$ 的 $I_e(\text{CO})$ 曲线在 $\Phi_{cavity}\approx 1.5$ 时出现了交叉,在较低的凹腔当量比下, $Ma=0.2$ 的 $I_e(\text{CO})$ 值高于 $Ma=0.15$ 的 $I_e(\text{CO})$ 值,而当 $\Phi_{cavity}>1.5$ 时, $Ma=0.2$ 的 $I_e(\text{CO})$ 值高于 $Ma=0.15$ 的 $I_e(\text{CO})$ 值。这说明凹腔当量比较低时,驻留时间对 CO 排放的影响较大;另外,在凹腔当量比相同的情况下,供油压力随着 Ma 的减小而减小,燃油雾化质量也随之恶化,这使得从值班火焰中逃逸的燃油量增加,从而使得 CO 生成量减小。而当凹腔当量比较高(富油程度较高)时, Ma 数较低的状态也能有较好的雾化质量,因此 CO 的生成量比较高。

对于 HC 排放,在 3 个不同的马赫数下,HC 排放的差别是比较小的。当 $Ma=0.2$ 时, $I_e(\text{HC})$ 最低,而 $Ma=0.15$ 和 $Ma=0.3$ 的 $I_e(\text{HC})$ 曲线则出现了交叉。在 HC 的消耗过程中,影响 HC 含量的因素主要包括 3 个方面:一是燃油的雾化质量,二是驻留时间,三是混合程度。在进口马赫数较大时,其空气流量较大,为保证凹腔当量比的相同,则必须增加供油量,提高供油压力,这会改善燃油雾化质量,有利于燃烧,加速 HC 的消耗,降低 HC 排放;另一方面,马赫数的增加会导致驻留时间缩短,从而减少 HC 的消耗量,导致 HC 排放增加;再者,马赫数增加,空气流速增加,会导致湍流度提高,这会加强燃油的混合,这是有利于降低 HC 排放的。三者的作用在不同的情况下所占的比重不一样。综合来看,对于 $W=21\text{ mm}$ 的中心钝体,当 $Ma=0.2$ 时,较好的雾化质量和较高的湍流度对加速 HC 消耗的作用大于驻留时间的缩短对 HC 排放的影响。在凹腔处于贫油状态下时, $Ma=0.15$ 的 $I_e(\text{HC})$ 较高,这主要是由于雾化质量较差导致的;而在凹腔处于富油状态下时, $Ma=0.3$ 的 $I_e(\text{HC})$ 较高,这是由于在凹腔内未能完全燃烧的 HC,进入了主流之后,在较高的气流速度下,更多的 HC 来不及燃烧。也就是说,在雾化质量都比较好的情况下,驻留时间对 HC 的排放量的影响较大。

对于 NOx 排放,由于气流速度的差别带来

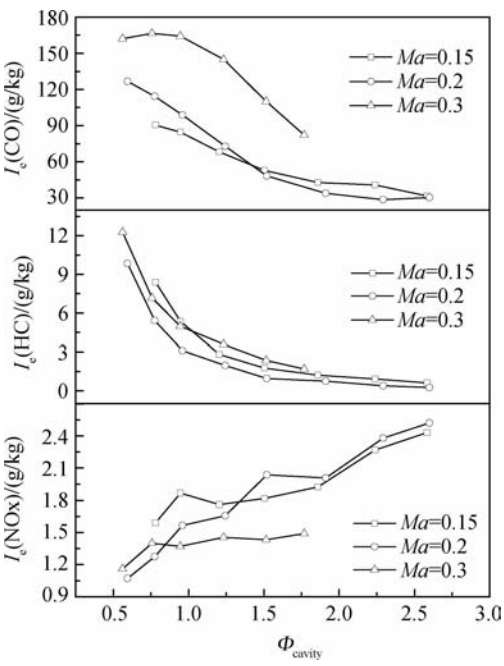


图 6 $W=21\text{ mm}$ 时的污染物排放

Fig. 6 EI vs. cavity equivalence ratio when $W=21\text{ mm}$

的驻留时间的差别,从而使得 $Ma = 0.15$ 时的 $I_e(\text{NOx})$ 比 $Ma = 0.3$ 时的 $I_e(\text{NOx})$ 值高(如图 6 所示). 另外,在凹腔当量比较低时,由于 $Ma = 1.5$ 的雾化质量较差,其蒸发时间比较长,故其火焰长度将会很长,这使得 NOx 大量生成的区域将增加,这也是影响 NOx 排放的一个重要方面. 但是从图 6 中还可以看出, $Ma = 0.2$ 的 $I_e(\text{NOx})$ 曲线同时贯穿了另外两条曲线. 在凹腔当量比较高时,供油压力较高,3 种马赫数下的雾化质量都比较好,所以, NOx 的排放量与 CO 和 HC 的排放量是直接相关的,即 CO 和 HC 的排放量越低,燃烧室内温度越高,因此, NOx 的排放量越高. 而在凹腔当量比较低时, NOx 的生成和消耗过程更加复杂. 在 $Ma = 0.2$ 的 CO 和 HC 排放都比 $Ma = 0.3$ 要低,但是前者的 NOx 排放也比较低,考虑到 NOx 的消耗过程,这种趋势是合理的. 因为两者的雾化质量都比较好,在凹腔内形成局部富油的扩散燃烧,在富油区域,过量的燃油及 CO 对 NOx 有还原作用,使部分消耗掉 NOx ,因此增加富油区的驻留时间,对减少 NOx 的排放是有利的.

图 7 为中心钝体宽度 $W = 25 \text{ mm}$ 时的 CO , HC , NOx 排放. 从图中可以看出,随着凹腔当量比的增加, $I_e(\text{CO})$ 和 $I_e(\text{HC})$ 值是下降的,这与上述趋势是一致的,而 NOx 的变化趋势则相对复杂. 下面分别进行阐述.

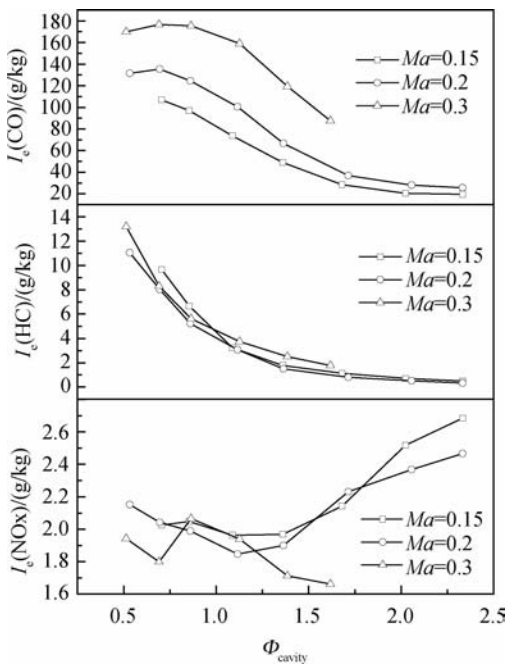


图 7 $W = 25 \text{ mm}$ 时的污染物排放

Fig. 7 EI vs. cavity equivalence ratio when $W = 25 \text{ mm}$

不同马赫数下的 3 条 $I_e(\text{CO})$ 曲线从高到低分别为 $Ma = 0.15$, $Ma = 0.2$, $Ma = 0.3$. 如前所述,一方面,低马赫数下的驻留时间长, CO 消耗较多,另一方面低马赫数下的雾化较差, CO 生成量较少,这就导致 CO 排放量较少. 图 7 中的 $I_e(\text{CO})$ 曲线没有像图 6 出现交叉,这是因为:在 $W = 25 \text{ mm}$ 时,进入凹腔的空气量比 $W = 21 \text{ mm}$ 时的多,故在相同的凹腔当量比下,前者的雾化质量较好,但是其雾化质量随凹腔当量比的变化比较平缓. 另外, $Ma = 0.2$, $Ma = 0.3$ 时,在较低的凹腔当量比下, $I_e(\text{CO})$ 先出现了上升的趋势,这是由于在较高的进口马赫数下,驻留时间较短,然而,在低当量比下,较差燃油雾化质量使得燃油蒸发所需要较长的时间,且此时燃烧区温度较低. 从化学动力学的观点来看, CO 是碳氢燃料的中间产物,并且 CO 的消耗比 HC 慢^[1]. 因此,在上述情况下,随着凹腔当量比增加,雾化质量提高使得消耗速度较快的 HC 排放降低,而消耗速度较慢的 CO 则首先出现了上升的趋势,从而使得 CO 生成量较少.

对于 $I_e(\text{HC})$,图 7 与图 6 的结果相似,但是前者的 3 条曲线更加靠近,如前所述,凹腔流量所占比例增加,使得燃油雾化质量变好,部分抹平了三者之间的差距.

对于 NOx 排放,总体来说 $Ma = 0.15$ 时的 $I_e(\text{NOx})$ 较高,而 $Ma = 0.3$ 时的 $I_e(\text{NOx})$ 较低. 当 $Ma = 0.15$ 和 $Ma = 0.2$ 时, $I_e(\text{NOx})$ 先降低再升高,这是由于在较低的凹腔当量比下,燃油雾化质量差,其蒸发时间比较长,故其火焰长度将会比较长,从而使生成 NOx 的区域较大;随着凹腔当量比增加,供油压力增加,雾化质量提高,火焰长度变短,从而使 NOx 生成量减小. 随着凹腔当量比进一步提高,雾化质量的影响变小,而燃烧温度增加使得 NOx 生成量快速上升. 当 $Ma = 0.3$ 时, $I_e(\text{NOx})$ 的变化比较复杂,出现两次下降,一次上升. 这样的变化是由于雾化质量的变化以及由于凹腔当量比的变化引起的燃烧区温度变化综合作用导致的复杂结果.

图 8 为中心钝体宽度 $W = 29 \text{ mm}$ 时的 CO , HC , NOx 排放. 从图中可以看出, $Ma = 0.15$ 和 $Ma = 0.2$ 的 $I_e(\text{CO})$ 曲线再次出现了交叉, $Ma = 0.15$ 时的 $I_e(\text{CO})$ 曲线变化较为平缓.

对于 HC 排放,随着雾化质量进一步提高, $Ma = 0.15$ 的 $I_e(\text{HC})$ 降低,其曲线更加靠近 $Ma = 0.2$ 的曲线. 随着中心钝体宽度 W 进一步

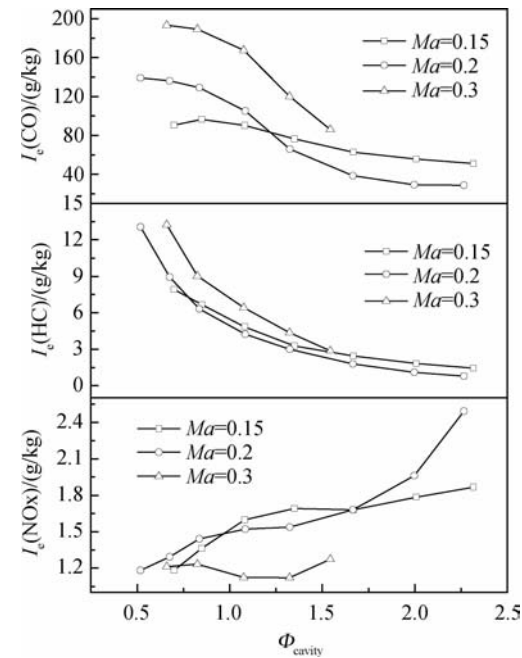


图 8 $W=29\text{ mm}$ 时的污染物排放

Fig. 8 EI vs. cavity equivalence ratio when $W=29\text{ mm}$

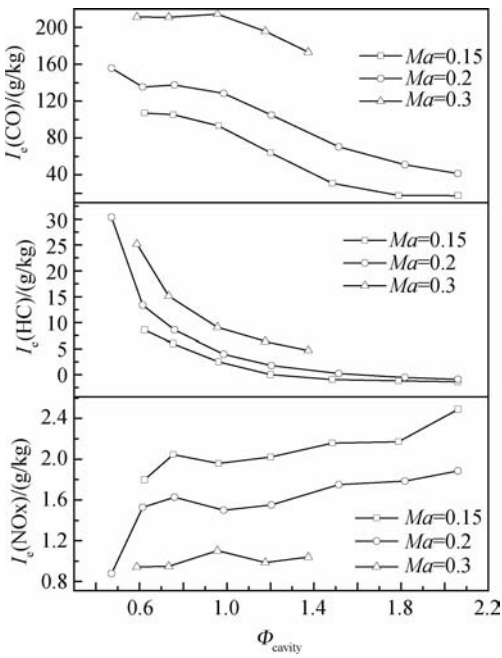


图 9 $W=36\text{ mm}$ 时的污染物排放

Fig. 9 EI vs. cavity equivalence ratio when $W=36\text{ mm}$

增加,凹腔内的空气流量比例进一步增加,使得雾化程度的影响进一步弱化,而驻留时间的作用和湍流度的作用趋于显著,使得 $Ma=0.2$ 和 $Ma=0.3$ 的 $I_e(\text{HC})$ 曲线距离变大。

如上所述,驻留时间和湍流强度的作用比重增加,使得 $Ma=0.2$ 和 $Ma=0.3$ 的 $I_e(\text{NO}_x)$ 曲线逐渐远离彼此。另外随着凹腔空气量比例的增加,雾化质量提高,燃烧区域的缩短,NOx 的生成量减小,这种作用在较低的进口速度下 ($Ma=0.15$) 表现得更明显。

图 9 为中心钝体宽度 $W=36\text{ mm}$ 时的 CO, HC, NOx 排放。此时凹腔内空气流量比例进上步增加,湍流强度的变化减缓,对污染物排放量的影响弱化,驻留时间的影响占主导作用, $I_e(\text{CO})$ 和 $I_e(\text{HC})$ 曲线从高到低分别为 $Ma=0.3$, $Ma=0.2$, $Ma=0.15$ 。而 $I_e(\text{NO}_x)$ 曲线则呈相反的安排。

如表 2 所述,不同中心钝体宽度下的燃烧室空气流量分配不同。当 $W=21\text{ mm}$ 时,凹腔前壁流量占燃烧室总进气量的 15.2%;而 $W=36\text{ mm}$ 时,凹腔前壁流量占燃烧室总进气量的 19.1%,分别对两者取 $Ma=0.2$ 和 $Ma=0.15$ 的流量,此时两者凹腔前壁流量相差约 5.8%,比较接近。在此情况下,以凹腔前壁计算的凹腔当量比为横坐标,绘出两者的排放曲线,如图 10 所示。在两者的凹腔前壁流量比较接近的情况下,相同凹腔当量

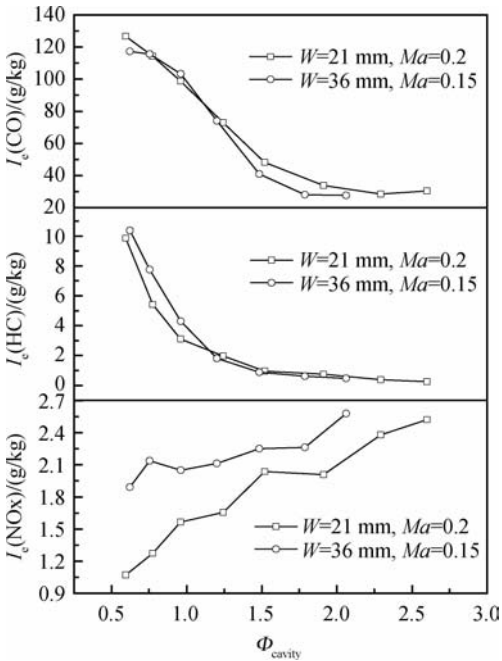


图 10 凹腔前壁流量相似条件下,不同中心钝体宽度下的排放

Fig. 10 Emissions of different bluff body widths with similar cavity air flow rate on front wall

比意味着供油量和供油压力相近。因此,两者的雾化质量、凹腔内的流动以及凹腔内的油气混合情况也是相似的。基于这样的原因,两者在凹腔内的污染物形成量也比较接近。从图中可以看出,两者的 $I_e(\text{CO})$ 和 $I_e(\text{HC})$ 曲线均比较接近,而 NOx 排

放曲线存在较大差异. 这种情况只能是主流流量的差异引起的. 这说明 CO 和 HC 的生成和消耗主要受凹腔内工作状况影响, 而 NO_x 的形成还受主流的影响. 对于 $W = 21 \text{ mm}$, $Ma = 0.2$, 由于主流流量及总流量较大, 其驻留时间较短, 且燃烧室总当量比较低, 使得 NO_x 较低.

从以上各曲线中还可以看出, 在低凹腔当量比时, $I_c(\text{CO})$ 曲线变化下降比较平缓, 甚至出现上升趋势, 而 $I_c(\text{HC})$ 曲线比较陡峭. 这是由于 HC 的消耗速度比 CO 消耗速度快^[1], 随着凹腔当量比的增加, 供油压力提高, 燃油雾化粒径变小, 燃油蒸发时间缩短, 使 HC 排放快速下降, 中间产物 CO 大量产生而来不及消耗. 凹腔当量比进一步上升时, 由于燃烧温度的提高, 使得 CO 快速下降.

4 结 论

设计了一个仅凹腔供油、能够改变中心钝体宽度的驻涡燃烧室, 在不同进口速度下进行了常压排放性能试验.

影响排放的因素主要包括雾化质量、凹腔当量比, 以及与进口马赫数相关的驻留时间等. 总体来说雾化质量、凹腔当量比的提高对降低 CO 和 HC 的排放是有利的, 但是这会使 NO_x 排放增加.

在低凹腔当量比时, $I_c(\text{CO})$ 曲线变化下降比较平缓, 甚至出现上升趋势, 而 $I_c(\text{HC})$ 曲线比较陡峭. 这是由于 HC 的消耗速度比 CO 消耗速度快^[1], 随着凹腔当量比的增加, 供油压力提高, 燃油雾化粒径变小, 燃油蒸发时间缩短, 使 HC 排放快速下降, 中间产物 CO 大量产生而来不及消耗. 凹腔当量比进一步上升时, 由于燃烧温度的提高, 使得 CO 快速下降.

在燃烧室内燃烧过程中, NO_x 的形成和消耗是非常复杂的过程, 目前只能作一些定性的分析, 而 CO 和 HC 的反应过程相对简单. 通过对不同中心钝体宽度下, 具有相同凹腔前壁流量的工况的比较, 发现 CO 和 HC 的形成主要受凹腔内工作状况影响, 而 NO_x 的形成过程更复杂, 主流也对其产生着重要的影响. 较高的主流流量导致的驻留时间的缩短, 以及燃烧室总当量比的降低, 使得 NO_x 排放较低.

参考文献:

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

[2] Mongia H C. Aero-thermal design and analysis of gas turbine combustion systems; current status and future direction[R]. AIAA 98-3982, 1998.

[3] Sturgess G J, Zelin J, Shouse D T, et al. Emissions reduction technologies for military gas turbine engines[J]. Journal of Propulsion and Power, 2005, 21(2): 193-217.

[4] Al-Attab K A, Zainal Z A. Design and performance of a pressurized cyclone combustor (PCC) for high and low heating value gas combustion[J]. Applied Energy, 2011, 88(2): 1084-1095.

[5] Hwang C H, Lee S, Kim J H, et al. An experimental study on flame stability and pollutant emission in a cyclone jet hybrid combustor[J]. Applied Energy, 2009, 86(7/8): 1154-1161.

[6] Gupta A K. Gas turbine combustion: prospects and challenges[J]. Energy Conversion and Management, 1997, 38(10/11/12/13): 1311-1318.

[7] Van Erp C A, Richman M H. Technical challenges associated with the development of advanced combustion systems[R]. Lisbon, Portugal; Symposium on Gas Turbine Engine Combustion, Emissions and Alternative Fuels, 1998.

[8] Abbe N T, Randall R F, Howard L W. Atmospheric effects of aviation; first report of the subsonic assessment project[R]. NASA-RP1385, 1996.

[9] International Civil Aviation Organization. International standards and recommended practices annex 16 to the convention on international civil aviation environmental protection volume II: aircraft engine emissions[M]. 3rd ed. Montreal, Canada; International Civil Aviation Organization, 1993.

[10] International Civil Aviation Organization. Report of the independent experts to CAEP8 on the second NO_x review & long term technology goals[R]. Committee on Aviation Environment protection, CAEP/8-WP/10, 2010.

[11] Roquemore W M, Shouse D, Burrus D, et al. Trapped vortex combustor concept for gas turbine engines[R]. AIAA-2001-0483, 2001.

[12] Hsu K Y, Goss L P, Trump D D. Performance of a trapped-vortex combustor[R]. AIAA 95-0810, 1995.

[13] Hsu K Y, Goss L P, Roquemore W M. Characteristics of a trapped-vortex combustor[J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(1): 57-65.

[14] Shouse D T. Trapped vortex combustion technology[EB/OL]. [2013-12-05] http://soliton.ae.gatech.edu/people/lsankar/MITE_Workshop_2000/presentations/Shouse.pdf.

[15] Straub D L, Casleton K H, Lewis R E, et al. Assessment of rich-burn, quick-mix, lean-burn trapped vortex combustor for stationary gas turbines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(1): 36-41.

[16] Bucher J, Edmonds R G, Steele R C, et al. The development of a lean-premixed trapped vortex combustor[R]. ASME Paper GT2003-38236, 2003.

[17] Edmonds R G, Steele R C, Williams J T, et al. Ultra-low NOx advanced vortex combustor[R]. ASME Paper GT2006-90319, 2006.

[18] 金义,何小民,蒋波. 富油燃烧/快速淬熄/贫油燃烧(RQL)工作模式下驻涡燃烧室排放性能试验[J]. 航空动力学报, 2011,26(5):1031-1036.
JIN Yi, HE Xiaomin, JIANG Bo. Experimental study on emission performance of rich-burn quick-quench lean-burn (RQL) trapped-vortex combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2011,26(5):1031-1036. (in Chinese)

[19] JIN Yi, HE Xiaomin, ZHANG Jinyu, et al. Experimental study on emission performance of an LPP/TVC[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012,25(3):335-341.

[20] 蒋波. RQL 驻涡燃烧室排放性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
JIANG Bo. An investigation on emission performance of RQL trapped vortex combustor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)

[21] 田中礼. LPP 驻涡燃烧室排放性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
TIAN Zhongli. An investigation on emission performance of LPP trapped vortex combustor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)

(编辑:秦理曼、王碧琚)