

文章编号:1000-8055(2013)08-1719-08

低排放驻涡燃烧室冷态流场特性试验

蒋 波, 何小民, 金 义, 吴泽俊, 丁国玉
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 利用粒子图像测速仪(PIV)对低排放驻涡燃烧室模型进行冷态流场测量, 获得该燃烧室流场的变化规律和压力损失的变化情况. 试验结果表明: 低排放驻涡燃烧室涡系结构稳定, 在主流后方的驻涡区存在主副双涡结构, 联焰板后方的驻涡区存在单涡结构, 两者之间特征截面呈现出双涡涡系逐渐向单涡涡系过渡, 涡心位置也随截面的变换而变化. 随着进口马赫数(0.15~0.30)的增大, 主涡面积随之增加, 副涡面积在进口马赫数为 0.2 时最大, 而各特征截面上主副双涡及单涡的涡心位置基本不变. 驻涡区涡系强度及其边缘的气流速度, 以及主燃区的气流速度均随进口马赫数增大而提高. 总压损失随进口马赫数(0.15~0.30)的增大而增加.

关 键 词: 低排放驻涡燃烧室; 冷态流场; 粒子图像测速仪; 涡系结构; 总压损失

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Experimental investigation on cold flow field characteristics of low emission trapped-vortex combustor

JIANG Bo, HE Xiao-min, JIN Yi, WU Ze-jun, DING Guo-yu

(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Particle image velocimetry (PIV) was used to perform experimental investigation on cold flow field characteristics of low emission trapped-vortex combustor (TVC) model. The varieties of the cold flow field characteristics and the total pressure loss coefficient were obtained. The results show that vortex structures are stable in the model of low emission TVC, and the double vortex structure exists in the trapped vortex area located in the rear of the mainstream, as well as the single vortex structure exists in the trapped vortex area located in the rear of flame transport board. The double vortex system transforms into the single vortex system and the vortex center positions show a little change in these different sections. The center positions of double vortex and single vortex in each section do not change with the inlet Mach number (0.15~0.30) increasing, but the primary vortex area in double vortex system increases, and the secondary vortex area also changes, which is the largest at Mach number of 0.2. The velocities of airflow in the primary combustion zone and the edge of the vortex, the vortexes strength, and the total pressure loss coefficient increase with the inlet Mach number changing from 0.15 to 0.3.

Key words: low emission TVC; cold flow field; PIV; vortex structure;
total pressure loss

收稿日期: 2012-08-18

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130802.1224.201308.1719_006.html

基金项目: 工业和信息化部民用航空发动机燃烧室基础预研项目

作者简介: 蒋波(1983—), 男, 四川南充人, 博士生, 主要从事航空发动机燃烧室低排放燃烧机理与燃烧技术的研究.

随着对环境保护的日益重视,世界各国及相关国际组织制定了日益严格的环保法规,对各种动力装置的排放标准作了明确的规范和规定.比如针对航空动力,近 30 年来国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)陆续制定了 Committee on Aviation Environmental Protection(CAEP)标准,包括 CAEP1(1986 年)、CAEP2(1996 年)、CAEP4(2004 年)、CAEP6(2008 年)和 CAEP8(2010 年)等多个排放标准条例.从全球燃烧污染排放的总量来看,发动机的排放所占的份额虽然很小,但其具有局部性和高空性的污染特点,因此需要开发具有低排放性能的发动机燃烧室,以减少对环境和健康的影响.低排放燃烧室和燃烧技术正是此研究背景的推动下不断发展和提高的.为适应不断严格的环保标准规范,保证未来对市场的占有率,欧美各国均投入了大量人力财力开展低排放燃烧技术的研究,并已取得明显的效果.如美国 20 世纪 70 年代的高效节能发动机(E3)计划、环境清洁燃烧室项目(ECCP),90 年代的高速研究机(HSR)计划、先进亚声速技术(AST)计划及 1999 年发起的超高效发动机技术(UDET)计划.欧洲 2000 年以来制订了高效和环境友好的航空发动机(EFAE)计划、降低排放和噪声的环境友好的航空发动机(VITAL)计划及通用电气航空发动机公司(GEAE)与法国国营航空发动机研制制造公司(SNECMA)联合发起的先进部件技术 TECH56(1998—2003)和其随后的前沿航空推进 LEAP56 计划等^[1-3].

在燃烧室发展历程中,靠旋流稳定的传统燃烧室得到了不断改进,这些改进减少了污染物排放,但仍面临瓶颈和挑战,越来越难满足日趋严格的排放标准的要求.与此同时,各种新概念燃烧系统和燃烧技术蓬勃发展,驻涡燃烧技术就属于其中之一.美国是最早提出驻涡燃烧室(trapped-vortex combustor, TVC)概念的国家,其对 TVC 技术的研究最早,成果也最多.20 世纪 90 年代,美国 Hsu 等人设计出了第 1 代 TVC 模型,之后又发展了第 2 代、第 3 代及带高压装置的第 3 代 TVC. TVC 技术经过十几年的发展,其原理趋于明朗,性能也逐步被挖掘.美国空军、海军、能源部、国家航空航天局等都在探索将该技术移植到可能的军用小涵道比涡扇发动机、商用大涵道比涡扇发动机、工业和舰船燃气轮机中.美国海军计划在 F414 试验台上装 TVC 做验证.美国能源部在发展以 RQL(rich-burn quick-quench lean-burn)模

式工作的 TVC^[4-6].

为了掌握低排放驻涡燃烧室的流动特性,合理组织燃烧,需要获得其流场特点.国外针对 TVC 火焰筒内部的流场分布和温度分布开展了大量的研究工作,通过数值研究获得了 TVC 的流场分布与流动特性,通过试验研究得到了 TVC 的火焰特征和燃烧特性^[7-8],针对流场特性的试验研究成果公布得很少.国内高校针对驻涡燃烧室的流动特性开展了大量的研究工作.樊未军等人基于简化后的驻涡燃烧室的火焰筒模型,开展了驻涡燃烧室凹腔双涡结构研究^[9]和污染排放试验^[10],利用 PIV 测量得到了凹腔(驻涡腔)区域的单一截面的流场特性.李瑞明等人探索了驻涡燃烧室主流对凹腔涡流动的影响^[11],侧重点在于探究主流的速度变化对凹腔涡的形状、涡心的位置和涡系的强度的影响.何小民等人对驻涡火焰稳定器冷态流场特性开展了初步研究^[12],侧重于驻涡火焰稳定器.秦伟林等人对驻涡应用于加力燃烧室的凹腔驻涡与支板稳焰组合模型开展了 PIV 试验,得出了不同进气角度、进口马赫数对该加力燃烧室模型冷态流场的影响^[13].国内针对驻涡燃烧室还开展了燃烧性能和排放性能等方面的研究^[10,14-15],取得了丰富的成果.

总体而言,国内外针对驻涡燃烧室开展了大量的研究工作,研究成果卓著,但针对驻涡燃烧室内的完整驻涡区与主燃区开展流场特性试验研究还比较少,未能掌握凹腔涡系变化情况和驻涡区气流向主燃区过渡的过程.

本文参考国内外研究成果,在本课题组前期研究成果的基础上,设计加工了低排放驻涡燃烧室模型,利用粒子图像测速仪(PIV),对此燃烧室模型的冷态流场进行测量,获得了该模型燃烧室的冷态流动特性.

1 燃烧室模型、试验系统和研究参数

1.1 低排放驻涡燃烧室模型

图 1 为低排放驻涡燃烧室模型示意图.低排放驻涡燃烧室进口宽×高为 180 mm×22 mm,燃烧室总长度为 326 mm,扩压器长度为 90 mm,火焰筒长度为 160 mm.该模型主要包括燃烧室机匣、内外涵通道、扩压器、导流体、主流钝体、火焰筒等;火焰筒内分为驻涡区、主燃区和掺混区;火焰筒壁面布置槽缝分配冷却气,结构示意图如图 2 所示,火焰筒前壁面冷却缝与水平轴向角度为 0°,45°,火焰筒后壁面冷却缝与水平轴向角度为 45°.

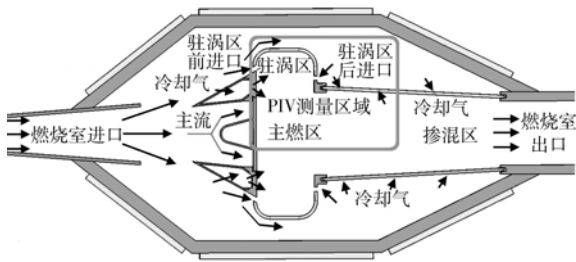


图1 低排放驻涡燃烧室模型示意图

Fig. 1 Schematics of low emission TVC

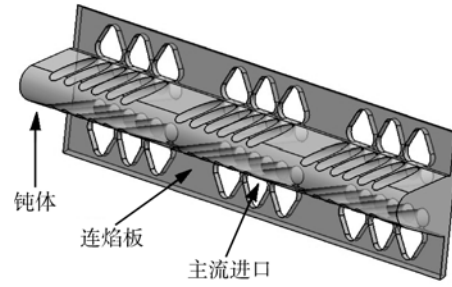


图3 主流掺混装置结构示意图

Fig. 3 Schematics of mainstream mixing structure

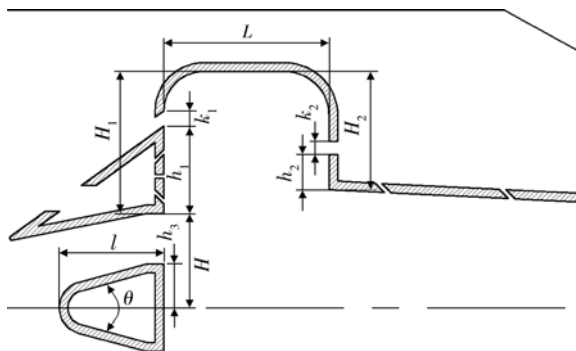


图2 凹腔及钝体结构示意图

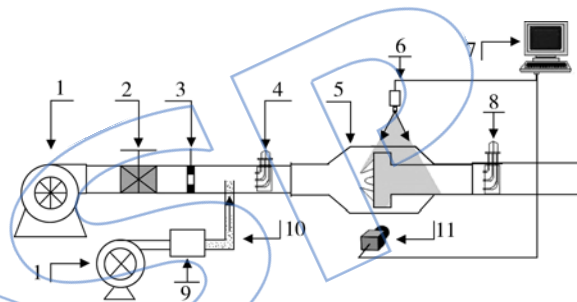
Fig. 2 Schematics of cavity and holder

凹腔分前后两个进口分别进气,两股气流与主流气流相互作用在凹腔的约束下形成驻涡。图2为低排放驻涡燃烧室模型中凹腔及钝体结构示意图。该凹腔的结构设计以课题组前期的研究成果^[12-15]为依据。图中各符号含义如下: L 为凹腔外壁长度; H_1 , H_2 分别为凹腔前壁面、后壁面高度; h_1 , h_2 分别为凹腔前进气口、后进气口高度; k_1 , k_2 分别为凹腔前后进气进口缝的宽度。各尺寸的相对值: $H/L=0.71$, $H_1/L=0.86$, $H_2/L=0.71$ 。

图3为主流掺混装置的结构示意图。本文中设计的主流掺混装置具有快速均匀掺混的功能,可以满足低排放驻涡燃烧室快速掺混淬熄的要求。由于凹腔气流向主流流动,与主流进气呈现垂直交汇,为加强掺混,参考美国RQL-TVC的气流分配盘的设计思想,采用多孔设计,并在气流交汇处采用三角孔结构,增加两股气流交汇时的接触面积,加强掺混,总开孔面积占主流总面积的38.6%。在此基础上把驻涡燃烧室的联焰板结构整合在此掺混装置上,保持前期的研究成果获得的堵塞比1/3不变。结构尺寸如图2所示,图中各符号含义如下: l 为钝体的长度, h_3 为钝体的高度, θ 为钝体的前沿面的夹角。各尺寸的相对量为: $h_3/L=0.26$, $l/L=0.63$, $\theta=60^\circ$ 。

1.2 试验系统

低排放驻涡燃烧室试验系统如图4所示,主要包括气源、来流管路、粒子发生器、试验件、PIV系统、压力测试系统等。



1 气源; 2 流量控制阀; 3 孔板流量计; 4 燃烧室进口总压靶;
5 驻涡燃烧室; 6 激光头; 7 数据处理系统; 8 燃烧室出口总压靶;
9 粉筒; 10 示踪粒子; 11 CCD相机

图4 低排放驻涡燃烧室试验系统

Fig. 4 Experimental system of low emission TVC

试验流场测量采用美国TSI(Trust Science Innovation)公司的二维PIV系统,该系统主要包括脉冲激光器、电荷耦合元件图像传感器(CCD相机)、同步器、数据处理系统。激光器的工作频率为10 Hz,可见光波长为532 nm。CCD相机分辨率为1600像素×1200像素,采集速度为30帧/s,每两帧图像之间的最小时间间隔为15 μs。分析软件采用Insight 6,具有实时图像采集和处理的能力。试验中示踪粒子采用轻质MgO,平均粒径为10 μm。本试验流场测量系统的测量误差为±5%。

试验的测量区域见图1所示的PIV测量区域。试验测量了多个特征截面,如图5所示,其中A截面为主流中间截面,E截面为联焰板中间正后方截面,A截面、E截面之间等距4等分,分别为B截面、C截面、D截面。目的是测量此5个截面的冷态流场,弄清各截面流场的特征及彼此过渡与变化的规律。

1.3 研究参数

研究低排放驻涡燃烧室中包含驻涡区与主燃区区域的不同截面位置(A截面~E截面)的流场特征,以及不同进口马赫数对其流场的影响、总压损失情况. 试验在常温常压下进行,试验参数变量: $Ma=0.15\sim0.30$, A截面~E截面.

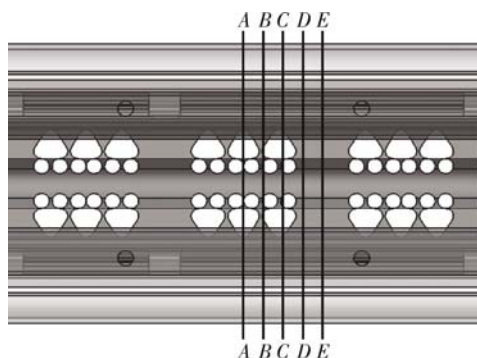


图5 测量截面位置示意图

Fig. 5 Schematics of positions of measurement sections

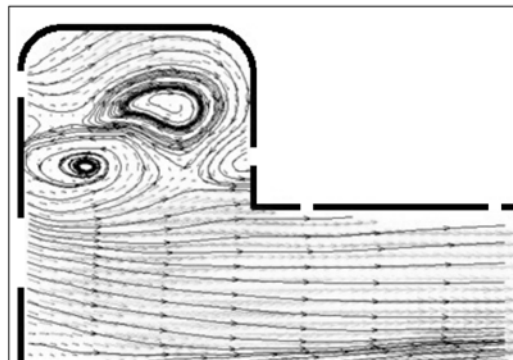
2 试验结果及分析

2.1 不同截面位置的流场特征

图6为当燃烧室进口 $Ma=0.20$ 时,不同位置截面的速度矢量分布. 由图可见, A~E各个截面呈现出不同的涡系结构. 其中A截面上驻涡区内出现明显的双涡结构, 即主涡(上方的大涡)和副涡(左下方的小涡, 左方为来流方向). 主涡的涡心位于凹腔中心偏右, 在凹腔宽度的 $2/3$ 位置处; 而副涡位于主涡的左前方靠下, 在凹腔左下角的 $1/4$ 位置处, 涡系大小约占凹腔面积的 $1/4$; 并且双涡涡系结构稳定. A截面上主流气流很强, 占满了整个主燃区, 把双涡紧紧地约束在驻涡区内部. 分析可知, 由于三股气流(主流气流、驻涡区前进口气流、驻涡区后进口气流, 如图6(a)所示)共同作用的结果. 三股气流从位于三个不同位置的进口进入 TVC 驻涡区和主燃区, 在二维截面上其中两股气流从前向后射入, 另一股从驻涡区后方向前射入, 与前两股交汇. 驻涡区前进口气流绕凹腔流动, 经驻涡凹腔的约束, 遇驻涡区后方向前射入的气流作用后, 向前回流, 产生主涡系; 主流上表面的气流与驻涡区前进口的气流作用, 一部分气流在主涡系回流的气流带动下, 也回流产生副涡(二次涡).

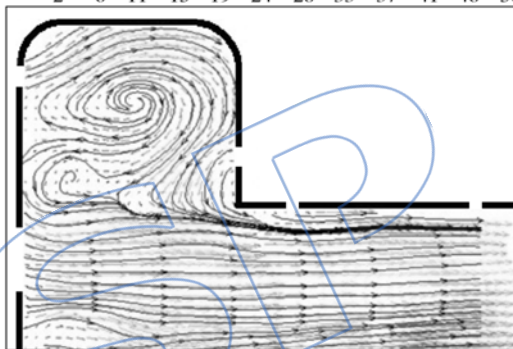
B截面的主涡明显, 涡心位置前移至凹腔中心位置; 副涡较之A截面有所减弱. 主流开始让

速度/(m/s) 2 7 12 16 21 26 31 36 41 45 50 55



(a) A截面

速度/(m/s) 2 6 11 15 19 24 28 33 37 41 46 50



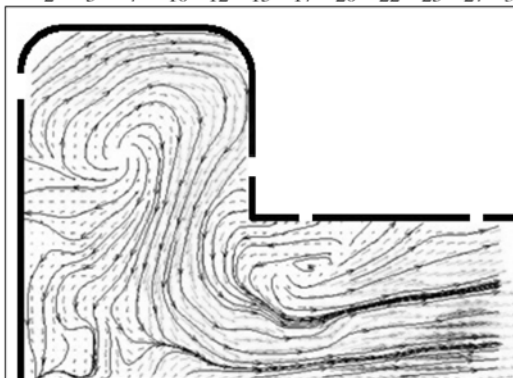
(b) B截面

速度/(m/s) 2 6 10 13 17 21 25 29 32 36 40



(c) C截面

速度/(m/s) 2 5 7 10 12 15 17 20 22 25 27 30



(d) D截面

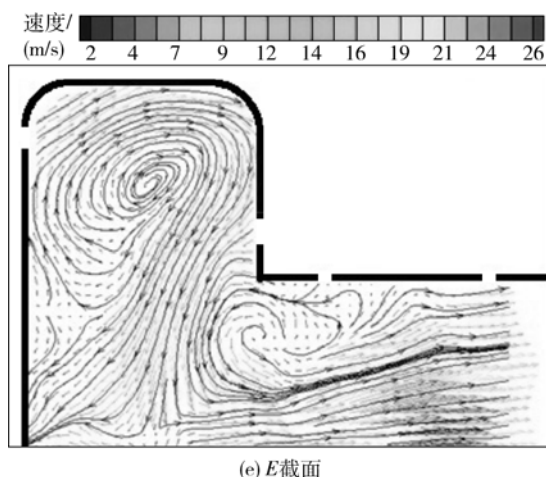


图 6 A 截面~E 截面的速度矢量分布

Fig. 6 Velocity vector distributions of sections A~E

出一部分空间给驻涡区后部流下来的气流,两者流线汇集并迅速向下游发展.这是由于 B 截面偏离主流中间位置,主流速度有所降低,能量减弱.

C 截面的主涡涡系与 B 截面的相似,副涡开始消失,主流让出了大部分主燃区的空间给驻涡区流下来的气流,两者流线在主燃区中部位置汇集,主流与驻涡区气流产生互相掺混的现象,并不断向下游发展.分析其原因,在于 C 截面更加偏离中间位置,此截面上的主流速度和能量进一步减弱,主流与驻涡区气流产生交汇,速度、能量及此处气流的位置都很合适实现掺混.

D 截面可见明显的单涡涡系,且涡心位置向主流方向偏移,位于凹腔中心位置靠下.因为 D 截面位于联焰板边缘靠内位置,已经不再有主流气流从左侧前方流入,但是仍然受到主流的一些影响.另外,在主燃区下游上方出现一个小面积的低速区,这是由于 TVC 火焰筒特殊的 T 型结构,使得驻涡区气流在此处转弯折流,联焰板后方没有主流作用,折流脱离火焰筒壁面向主燃区中央偏离,产生了这个低速区.

E 截面仍然可见稳定的单涡结构,且驻涡区的气流可以直接流动到主燃区中间位置,到达钝体的后方.这是由于此截面位于联焰板中间位置的正后方,不受主流的影响. E 截面的流场特点能恰到好处地实现了联焰板传递火焰至主流及传热传质的作用.

综上所述,可知在主流后方的驻涡区空间存在主副双涡结构,主涡可用于燃烧室稳定火焰,副涡的存在起到了驻涡区向主流进行传热传质和加强掺混的作用;在联焰板后方空间,驻涡区内有稳定的单涡稳定火焰,且气流可以顺利地流至钝体后

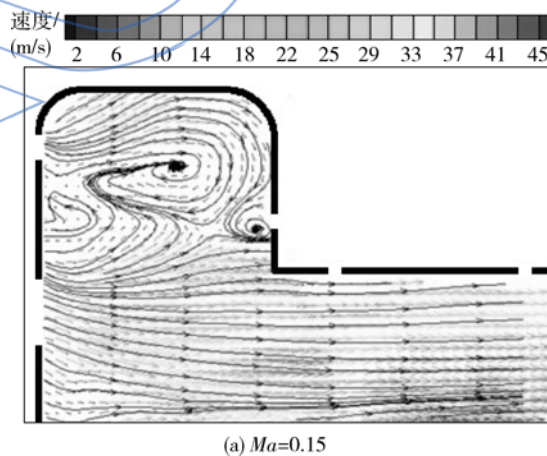
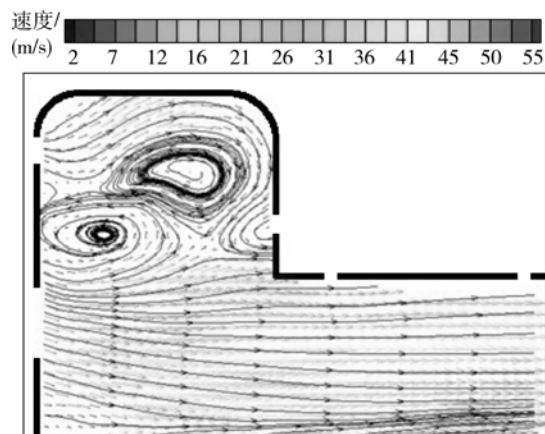
方,在此过程中实现传递火焰引燃主流燃气的作用.在整个驻涡区和主燃区空间,涡系在双涡和单涡之间过渡,主涡涡心位置在驻涡区中心位置附近微小移动,副涡在驻涡区前部的部分空间中存在,并过渡直到消失.因此低排放驻涡燃烧室的驻涡区和主燃区空间中存在的是复杂的空间涡系结构.

2.2 进口马赫数对流场的影响

图 7 为不同进口马赫数下 A 截面驻涡区和主燃区的速度矢量分布.从图中可知:

1) 在不同的进口马赫数条件下,在此截面上主流的气流均未被卷入到驻涡区内部,对驻涡区的涡系结构和气流流动产生了约束作用.驻涡区内的气流来源于前后两股气流和驻涡区前壁的少量冷却气流.驻涡区内的流动主要受约束于凹腔结构和主流气流的共同作用,产生了稳定的主、副双涡结构.

2) 随着进口马赫数的增大,主、副双涡的位置几乎没有变化,主涡稳定性都很好,主涡面积随进口马赫数的增大而增加,而副涡在进口马赫数为 0.20 时最稳定,面积最大.驻涡区涡系的边缘气流速度和涡系强度及主燃区的气流速度均随进口

(a) $Ma=0.15$ (b) $Ma=0.20$

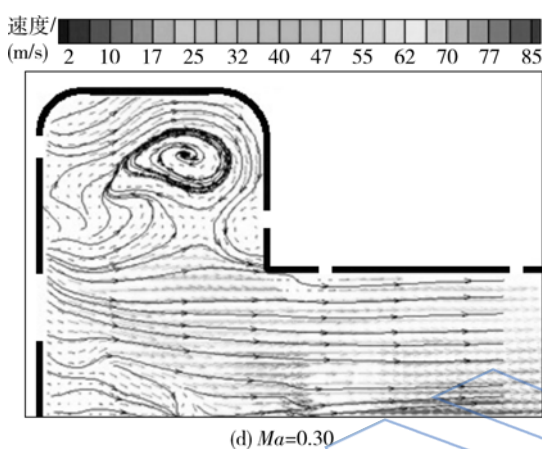
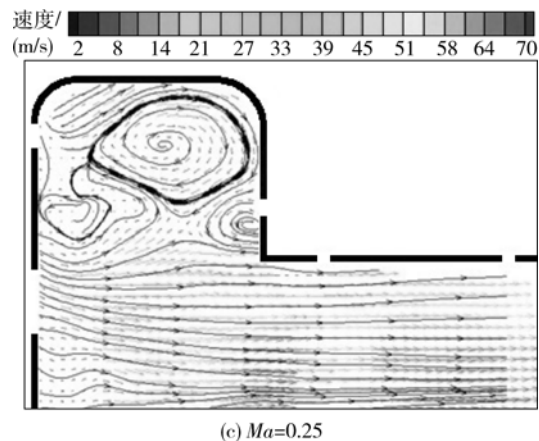


图7 A截面的速度矢量分布随进口马赫数的变化

Fig. 7 Velocity vector distribution of section A varying with inlet Mach number

马赫数增大而增大. 在马赫数为 0.15 时主燃区的最大气流速度在 45 m/s 范围内(如图 7(a)所示), 而当马赫数增大到 0.30 时, 主燃区的最大气流速度在 85 m/s 范围内(如图 7(d)所示). 此截面上主流气流速度很大, 牢牢占据着整个主燃区的空间, 仅靠驻涡区的副涡的作用来实现驻涡区主涡与主流之间质量、动量及能量的传递和交换.

图 8 为不同进口马赫数下 E 截面驻涡区和主燃区的速度矢量分布. 从图中可知:

1) 在不同的进口马赫数条件下, 驻涡区内都形成了单涡涡系结构, 且涡系面积及涡心位置不随进口马赫数的变化而改变, 说明燃烧室流动形成了自模, 涡系结构稳定.

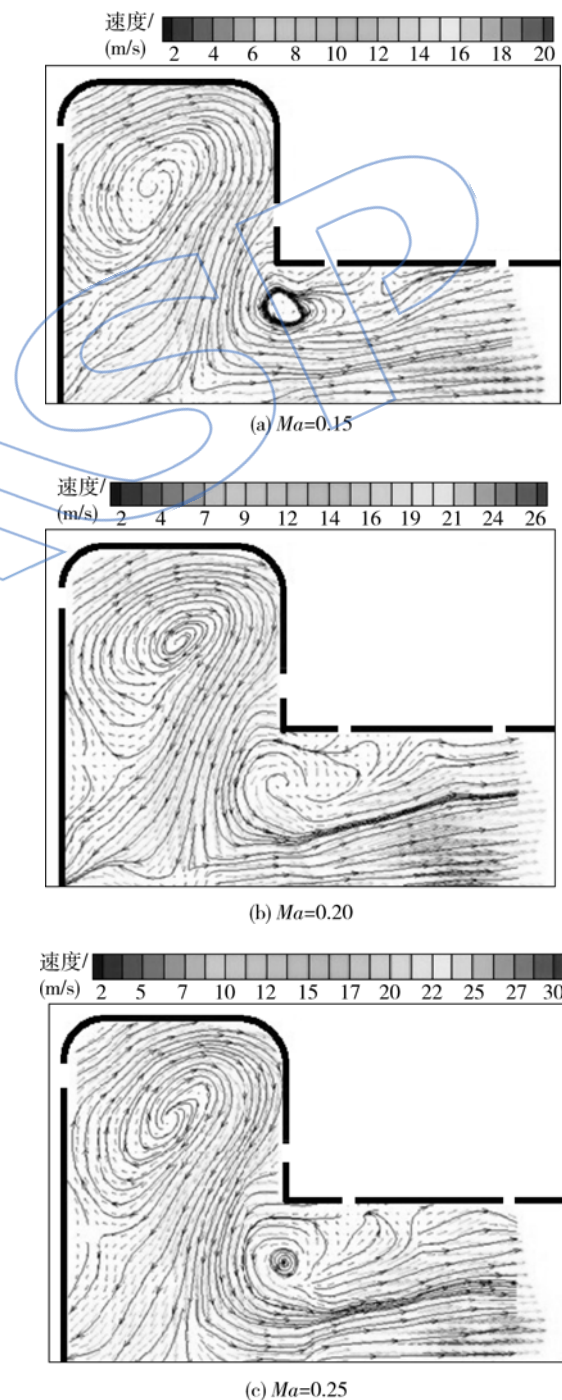
2) 在主燃区的下游上方出现的低速区, 其面积随进口马赫数的增大而增大. 这是由于驻涡区流出的气流速度随进口马赫数的增大而增大, 因此穿透力变强, 此气流向主燃区中央偏离程度增大, 因此由其产生的低速回流区面积增大. 在燃烧室中此低速回流区的形成是不利的. 因为此低速

回流区形成于主燃区边缘, 易有油气或未燃尽的燃气进入继续燃烧, 产生局部高温区. 因此需要布置新鲜冷却气来保护火焰筒表面或冲散此低速区.

2.3 低排放驻涡燃烧室的总压损失

总压损失系数定义为 $\sigma = (p_2^* - p_1^*) / p_1^*$, p_1^* 为低排放驻涡燃烧室进口总压, p_2^* 为低排放驻涡燃烧室出口总压.

图 9 给出了总压损失系数随进口马赫数的变化. 从图中可得出: 随着进口马赫数的增大, 此模型试验件低排放驻涡燃烧室的总压损失系数随之



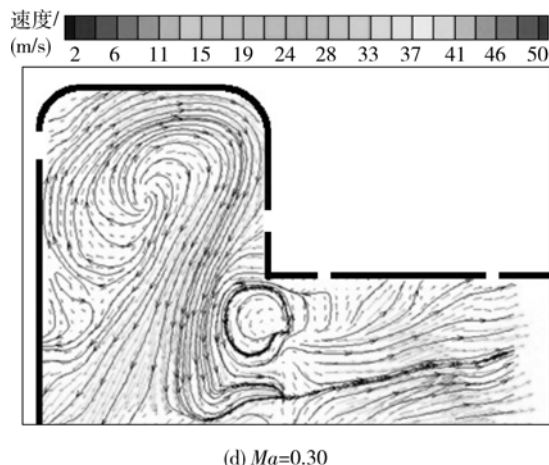


图8 E截面的速度矢量分布随进口马赫数的变化
Fig. 8 Velocity vector distribution of section E varying with inlet Mach number

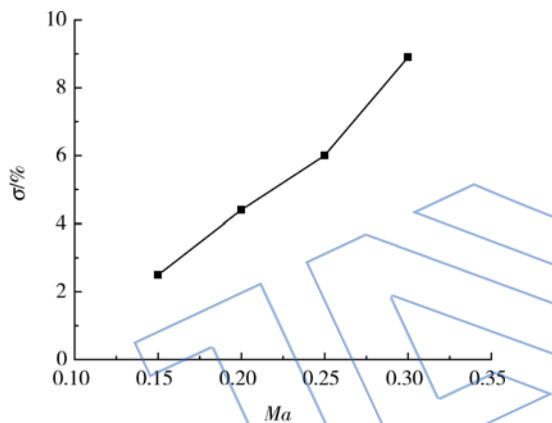


图9 总压损失系数随进口马赫数的变化
Fig. 9 Total pressure loss coefficient varying with inlet Mach number

增加,当 $Ma=0.15$ 时,总压损失系数较低,为2.5%;当 $Ma=0.30$ 时,总压损失系数增至8.9%。原因在于,燃烧室进口气流速度的增大,模型试验件低排放驻涡燃烧室内各流路进口的阻力增大,回流区的回流强度增大,回流区对气流的卷吸力增强。

3 结论

设计和加工了低排放驻涡燃烧室模型,开展了驻涡区与主燃区区域内不同特征截面的流场特征以及不同进口马赫数对其流场影响的试验研究,获得了如下试验结果:

1) 在各个截面呈现出了不同的涡系结构,在主流后方的驻涡区存在主副双涡结构,连焰板后方的驻涡区存在单涡结构,双涡涡系向单涡涡系

过渡,涡心位置也随之移动变化。但在各个截面的驻涡区均有一个稳定的涡系存在,此涡系结构合理,这为低排放驻涡燃烧室稳定火焰提供了保障。连焰板后方驻涡区气流可以传递至钝体后方,可实现传递火焰至主流的作用。

2) 各个截面的驻涡区内的主副双涡及单涡的涡心位置不随进口马赫数(0.15~0.30)的变化而改变,稳定性都很好。主涡面积随进口马赫数的增大而增加,副涡的面积在 $Ma=0.20$ 时最大。驻涡区涡系的边缘气流速度和涡系强度及主燃区的气流速度均随进口马赫数增大而提高。

3) 此模型试验件低排放驻涡燃烧室的总压损失随进口马赫数(0.15~0.30)的增大而增加。

参考文献:

- [1] 赵坚行. 民用发动机污染排放及低污染燃烧技术发展趋势[J]. 航空动力学报, 2008, 23(6): 986-996.
ZHAO Jianxing. Pollutant emission and development of low emission combustion technology for civil aero engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6): 986-996. (in Chinese)
- [2] Smith R. Advanced low emissions subsonic combustor study[R]. NASA-19990024925, 1998.
- [3] Plencner R M. Engine technology challenges for the high-speed civil transport plane[R]. AIAA-98-25025, 1998.
- [4] Roquemore W M, Shouse D, Burrus D, et al. Trapped vortex combustor concept for gas turbine engines[R]. AIAA 2001-0483, 2001.
- [5] Haynes J, Janssen J, Russell C, et al. Advanced combustion systems for next generation gas turbines[R]. GE Global Research DE-FC26-01NT41020, 2006.
- [6] Kastl J A, Herberling P V, Matulaitis J M. Low NOx combustor development[R]. NASA/CR-2005-213326, 2005.
- [7] Burrus D L, Johnson A W, Roquemore M, et al. Performance assessment of a prototype trapped vortex combustor concept for gas turbine application[R]. ASME Paper 2001-GT-0087, 2001.
- [8] Hsu K Y, Gross L P. Characteristics of a trapped vortex combustor[J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(1): 57-65.
- [9] 樊未军, 易琪, 严明, 等. 驻涡燃烧室凹腔双涡结构研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 66-71.
FAN Weijun, YI Qi, YAN Ming, et al. A study of double vortexes structure in the trapped vortex combustor[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26(9): 66-71. (in Chinese)
- [10] 樊未军, 严明, 易琪, 等. 富油/快速淬熄/贫油驻涡燃烧室低 NOx 排放[J]. 推进技术, 2006, 27(1): 88-91.
FAN Weijun, YAN Ming, YI Qi, et al. Low NOx emission of rich-burn, quick-mix, lean-burn trapped vortex combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(1): 88-

91. (in Chinese)
- [11] 李瑞明,刘玉英,刘河霞,等. 驻涡燃烧室主流对凹腔涡流动的影响[J]. 航空动力学报,2009,24(7):1482-1487.
LI Ruiming, LIU Yuying, LIU Hexia, et al. Impact of mainstream on the vortex flow of cavity in trapped vortex combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7): 1482-1487. (in Chinese)
- [12] 何小民,王家骅. 驻涡火焰稳定器冷态流场特性的初步研究[J]. 航空动力学报,2002,17(5):567-571.
HE Xiaomin, WANG Jiahua. An investigation on the fluid characteristics of trapped-vortex combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(5): 567-571. (in Chinese)
- [13] 秦伟林,何小民,金义,等. 凹腔驻涡与支板稳焰组合加力燃烧室模型冷态流场试验[J]. 航空动力学报,2012,27(6):1347-1354.
QIN Weilin, HE Xiaomin, JIN Yi, et al. Experimental investigation on the cold flow characteristics of an afterburner with cavity/strut hybrid flameholders[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(6): 1347-1354. (in Chinese)
- [14] 何小民,许金生,苏俊卿. 驻涡燃烧室燃烧性能试验[J]. 航空动力学报,2009,24(2):318-323.
HE Xiaomin, XU Jinsheng, SU Junqin. Experimental research of the performance of the trapped-vortex combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(2): 318-323. (in Chinese)
- [15] 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的试验研究[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)