

三级旋流燃烧室流动和点火过程中火焰传播特性^{*}

任勇智¹, 李建中¹, 金武¹, 胡阁¹, 袁丽²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 航空发动机热环境与热结构工业和信息化部重点实验室, 江苏南京 210016;
2. 陆军工程大学 国防工程学院, 江苏南京 210007)

摘要: 为了研究三级旋流燃烧室的流动以及预燃级非预混燃烧特性, 设计了三级旋流燃烧室试验结构方案与光学非接触测量方案, 研究了总压损失与当量比对三级旋流燃烧室流动特性及火焰结构的作用和点火过程中火焰特征结构与特征时间的影响规律。研究表明: 总压损失对燃烧室内热态流场结构无影响, 其主要改变具体的速度值大小; 在头部高速射流区存在内、外剪切层, 随着流动向下游发展, 高速气流紧贴壁面流动; 火焰结构随着当量比变化存在“V”型火焰、过渡火焰以及包络火焰三种形态, 过渡当量比在0.6左右; 热态回流区扩张段扩张角度随总压损失的增大而增大, 随着当量比增大先减小后增大; 点火过程中存在大尺度火焰的熄灭与复燃, 复燃火焰从回流涡附近以三维螺旋方式回传; 随总压损失的增大, 火核生成时间延长, 火焰传播时间缩短, 熄火复燃时间缩短; 随当量比增大, 火核生成时间延长, 火焰传播时间先延长后缩短, 熄火复燃时间缩短。

关键词: 三级旋流燃烧室; 非预混燃烧; 流动特性; 点火过程; 火焰传播

中图分类号: 231.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2021) 09-2045-09

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.190861

Characteristics of Flow Field and Flame Propagation of Ignition Process in Three-Staged Swirl Combustor

REN Yong-zhi¹, LI Jian-zhong¹, JIN Wu¹, HU Ge¹, YUAN Li²

(1. Key Laboratory of Aero-Engine Thermal Environment and Structure, Ministry of Industry and Information Technology, College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. School of National Defense Engineering, The Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: To study the flow and non-premixed kerosene-air pilot stage combustion characteristics of the three-staged swirl combustor, an experimental rig and non-contact optical measurement system of the combustor were designed. The effects of total pressure loss and equivalent ratio on flow and critical flame shape characteristics were investigated. In addition, characteristic time and critical flame structure in the ignition process were investigated. The results show that the total pressure loss has seldom effects on the reacting flow field structure of the combustion chamber, which mainly changes the specific velocity value. Moreover, there are inner and outer shear layers in the high-speed jet region of the combustor. As flow propagates downstream, the high-speed air flows along near-wall area. The flame structure changes with the equivalent ratio in three forms: V-shaped flame, transition flame and envelope flame, and the critical equivalence ratio of flame shape transition was near

* 收稿日期: 2019-12-13; 修订日期: 2020-03-12。

作者简介: 任勇智, 硕士生, 研究领域为航空发动机燃烧技术。

通讯作者: 李建中, 博士, 教授, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。

引用格式: 任勇智, 李建中, 金武, 等. 三级旋流燃烧室流动和点火过程中火焰传播特性[J]. 推进技术, 2021, 42(9): 2045-2053. (REN Yong-zhi, LI Jian-zhong, JIN Wu, et al. Characteristics of Flow Field and Flame Propagation of Ignition Process in Three-Stage Swirl Combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(9): 2045-2053.)

0.6. The expansion angle of high speed region in combustor inlet increases with the rise of total pressure loss. While equivalent ratio increases, the expansion angle decreases initially and increases after the critical equivalence ratio. In the process of ignition, there exists large-scale flame extinction and reignition, during which the reignited flame propagates backward to the combustor in a three-dimensional spiral way from center recirculation vortexes. In addition, with the rise of total pressure loss, the formation time of ignition core increases, and a duration time drops both for flame propagation and reignition. With the rise of equivalent ratio, the time of ignition core formation increased and that of flame reignition decreased. The flame propagation time increased firstly and reduced after equivalent ratio exceeds the critical point.

Key words: Three-staged swirl combustor; Non-premixed combustion; Flow characteristics; Ignition process; Flame propagation

1 引言

随着航空发动机向更高推重比方向发展,燃烧室面临着许多技术挑战,包括但不限于拓宽稳定工作范围、更加均匀的出口温度分布、更少的冷却气量下保证火焰筒寿命不过度恶化。为了保证这些相互矛盾的技术指标能够得到很好的平衡,需要提出新的燃油与空气的合理匹配设计方案。头部空气分级的三级旋流燃烧室成为主要的解决方案,三级旋流器通过在气动上将燃烧空气与燃油分为主、副燃烧区,占总气量小部分的值班级空气与中心喷嘴喷出的燃油混合,在燃烧室中形成扩散火焰,在大工况下该级火焰被用来保证点火与熄火性能,在低工况下单独工作保证发动机低工况稳定工作;主燃级旋流空气在进入燃烧室前与雾化燃油混合,被点燃后形成预混火焰,此时火焰处于极贫燃烧,可满足燃烧效率、温升、污染物排放等要求,且它具有重量轻、结构紧凑等优势,符合航空发动机的发展趋势^[1-3]。

多级旋流空气的存在使得燃烧室内流动情况变得复杂,此时燃烧室内存在多种复杂的大尺度结构。国内外通过先进光学测量实验、雷诺时均模拟、高精度大涡模拟等手段开展了在多工作条件下的三级旋流燃烧室的流动、点熄火性能、燃烧效率、污染物排放研究。Wang等^[4]通过大涡模拟的方法研究了CFM56燃烧室的瞬态流场特征,发现在燃烧室中轴线上存在旋进涡核,涡核附近存在明显的低压区,涡核的挤压作用会提高当地瞬时径向速度,同时当地低压区会继续向下游向外围发展;相邻两级旋流空气之间由于速度差会存在高速剪切层,高速剪切层会在Kelvin-Helmholtz不稳定机理下诱导产生各种不同尺度的相干结构,这些漩涡结构会通过改善油气混合对燃烧过程产生重要影响^[5-6]。Lazik等^[7]对R-R公司的Lean-burn燃烧室进行了实验研究,研究了预

燃级旋流强度、流量分配、雾化方式等参数对点火性能、NO_x等污染物生成、贫油熄火性能以及燃烧不稳定性的影响。密歇根大学的Driscoll团队Temme等^[8]使用PIV(Particle image velocimetry)与PLIF、高频压力传感器等研究了TAPS燃烧室的冷热态流场结构、火焰锋面结构以及自激振荡现象,发现在燃烧室进口存在中心回流区、唇口回流区以及角落回流区结构,且主、预燃级之间的轴向速度剪切是影响火焰稳定的重要因素;在一个脉动周期内中心扩散火焰根部在轴向上存在抬升与回传,认为该现象是燃烧不稳定的来源之一。国内对于三级旋流燃烧室的研究重点关注旋流器结构与气动参数对流动与燃烧的宏观特性的影响。林宇震团队设计了一种新型中心分级燃烧室,通过数值模拟、PIV实验等技术研究了套筒扩张角^[9]、台阶高度^[10]、预燃级气量分配^[11]对预燃级燃油喷雾特性、贫油熄火性能、冒烟排放性能等参数的影响。何小民团队探究了三级旋流器的套筒角度^[12]、油气参数^[13]、主、预燃级旋向和旋流数组合等^[14-18]对三级旋流燃烧室的燃烧性能的影响。中科院工程热物理研究所的杨金虎等^[19]研究了双级旋流预膜式空气雾化预燃级两级旋流旋向、旋流强度对流场结构、燃油浓度分布和燃烧稳定性的影响。周瑜等^[20]使用高精度大涡模拟数值模型计算了高压工作条件下的单头部三级旋流燃烧室内流场从启动到定常状态的非定常发展过程,捕捉到了主旋流器下游涡旋破碎的细观过程。

国内外针对三级旋流燃烧室的流动与燃烧特性已有大量研究,但对于仅预燃级非预混燃烧情况下的热态流场以及点火过程研究较少。因此本文设计了一种带有三级旋流器头部结构的单头部燃烧室,使用PIV和高速摄影等非接触测量方法,研究在仅有预燃级供油的情况下,气动参数与当量比对三级旋流燃烧室内的热态流动特性与点火过程中的火焰传

播特性的影响。

2 研究对象与方法

本文研究的三级旋流燃烧实验段主要由进气段、三级旋流器、燃油管路与离心喷嘴、尾气排出段组成,三级旋流器为两级轴向旋流器加一级径向的组合方式。值班级轴向旋流器由逆时针偏转角为 43° 的12个曲叶片加文氏管组合而成,旋流数为1.0;二级旋流器与一级旋向相反,由偏转角为 37° 的10个曲叶片加文氏管组合而成,旋流数为0.8;三级为径向旋流器,由20个安装角为 45° 的曲叶片组成,旋流数为0.8。通过前期数值模拟验证,在设计点工况下,主燃级空气流量占旋流器总气量80%,预燃级约占20%。本文所涉及旋流器与传统三级旋流器其相比具有主燃级流量占比高、尺寸大的特点,其流动与点火特性可为未来的大尺寸分级旋流器提供设计参考。

贫油多级旋流燃烧试验平台主要包括:气源、光学测试系统、多级旋流燃烧实验段、点火系统、流量和火焰结构等测量系统,如图1所示。其中,气源采用罗茨风机,压头 $0\sim 70\text{kPa}$,最大流量 1.5kg/s ,使用LZB系列玻璃转子流量计测量空气体积流量,测量精

度误差为 $\pm 1.5\%$,使用U型水排测量流量计前压力实现流量修正,将体积流量转化为质量流量,进出口使用皮托管和水排测量进出口总压差。燃烧室采用高能火花塞点火,点火频率 2Hz ,点火能量 0.4J ,火花塞中心距离旋流器出口 55mm ,其放电端面距离燃烧室内部上壁面 8mm 。图2具体给出了燃烧室试验段结构的试验段放大图(左)和旋流器结构示意图以及对应的特征火焰结构图(右),为了满足PIV实验测量要求,设计了纵截面 $105\text{mm}\times 105\text{mm}$ 的石英玻璃窗,以及同时设计位于燃烧室尾部横截面上的观察窗用于激光射入。二股气流通道对PIV实验中的带颗粒高温燃气从燃烧室尾缘进行吹除,在进口段设置了匀流孔直径为 1mm 的匀流板,在匀流板后开孔并放置单点总压管测量来流总压。中心值班级燃油通过离心喷嘴喷出,通过电磁阀门的打开与闭合控制喷注时序。在实际实验中气流和燃油由右向左流动,但是在下文的分析中,为了符合常规观察习惯对得到的结果进行了坐标变换,转化为气流和燃油为从左向右流动,变换前后的坐标原点均设在旋流器出口截面中心处, x 正方向为流动方向。

PIV试验采用的激光器为Nd:YAG双脉冲激光器,单脉冲最大能量为 200mJ ,激光波长 532nm ,最大

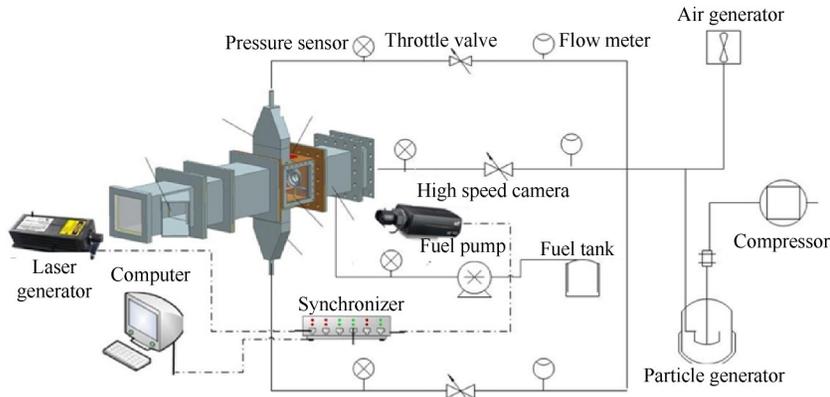


Fig. 1 Schematic view of test facility system

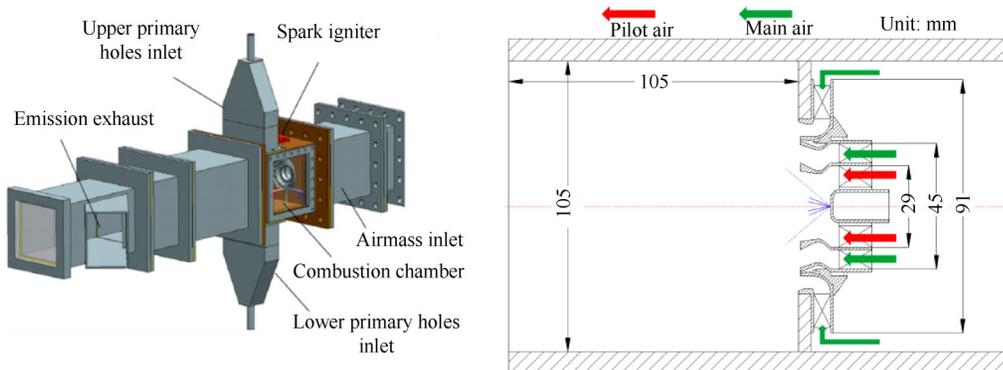


Fig. 2 Schematic view of combustor and triple-stage swirler

工作频率为15Hz。数字相机为Imperx公司的Bobcat B2041型,最大分辨率为2048×2048像素,最小跨帧时间为200ns,最大拍摄频率20Hz。同步控制器为Micro Pulse 725型,通过多个延时通道同时产生多个延时的触发信号来控制激光器、数字相机和图像采集板,使它们工作在严格同步的信号基础上。PIV试验使用的示踪粒子为氧化镁颗粒,可以在高温下稳定存在而不被烧蚀,其平均粒径为10 μm ,喷注位置距离燃烧室进口5m,具有足够长的距离实现粒子与气流的充分掺混,实现粒子良好的跟随性,其粒径也小于燃油颗粒粒径,对燃油颗粒的运动轨迹影响较小,因此对于油气分布的影响较小。高速相机用来拍摄燃烧时发光基团结构与点火过程中动态火焰变化,实验中调节焦距至燃烧室中心子午面。相机分辨率为1664×1654pixels,拍摄频率为769Hz,像素放大率为157.5pixels/cm。

3 实验结果及分析

3.1 燃烧室稳态流动与燃烧特性

图3给出了0.5当量比不同总压损失下的三级旋流燃烧室的轴向速度分布云图,白色带箭头实线为燃烧室内的流线,示出了回流涡核位置以及燃烧室内各点的流动方向。由于在中心子午面上的流动具有较好的对称性,因此仅取燃烧室一半高度上的流场分布进行研究,分别定义燃烧室无量纲长度与无量纲高度为 $X/H, Y/H$,其中, H 为燃烧室高度的一半,定义总压损失系数 $\sigma=(p_{in}-p_{out})/p_{in}$, p_{out} 为燃烧室出口总压值, p_{in} 为进口总压值。燃烧室在各个总压损失下的头部高速区为单股高速射流形式,三级气流没有明显的分层流动特性,这是由于三级之间用来分开气流的台阶高度较小,不能在燃烧室进口处形成唇口回流区,预燃级气流从文氏管出口流出后迅速扩

张,并与主燃级气流掺混后向下游流动。高速射流与中心回流区以及角落回流区之间存在较大轴向速度差,诱导产生了该位置的内、外高强度剪切层。随着总压损失增大,高速区面积与长度增大,更加靠近燃烧室进口,高速区与角落回流区形成的外剪切层厚度略有增加,涡心位置与回流区高度基本不变。

三级旋流燃烧室在进口处存在高速气流扩张区,碰壁位置附近的速度分布与涡量分布对于燃烧室稳定性具有重要作用;同时,中心回流区涡心位置流动对于火焰长度,火焰稳定位置、点火性能等具有重要作用。图4给出了当量比为0.5时热态流场轴向速度、径向速度与平面涡量在燃烧室高度上的分布情况。平面涡量定义为 $\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$,在 $X/H=0.55$

时,轴向速度在 $0.7H$ 达到峰值,峰值速度随着压损的增大而增大,回流区内(轴向速度 $U \leq 0$)速度分布均匀,且回流速度随着压损的增大而增大,回流区高度约为 $0.47H$,随总压损失变化较小;径向速度在回流区内部在三个工况条件下均接近0,头部回流区的流动由轴向回流主导,在高速区内径向速度随总压损失的增大而增大;观察涡量随高度变化发现高速区出现两个方向相反的涡量峰值,说明此处形成了内、外两个剪切层,总高度约为 $0.25H$ 。在 $X/H=1.4$ 时,高速区外扩来到 $0.95H$,回流区高度增大到约至 $0.72H$,中心回流速度比 $X/H=0.55$ 时增大1.25倍;径向速度在此刻存在多个峰值,数量级比 $X=0.55H$ 时小一个数量级,观察流线分布发现,这是由于回流涡的强卷吸作用导致流线在此处向上偏转,出现了小幅度的径向速度值;此截面上的高速区峰值速度较前一个截面减小,剪切层高度减小为 $0.12H$ 。

如图5(a)所示在PIV得到结果的基础上,做出回流区边界即燃烧室子午面上轴向速度为0的曲线(白色实线)。通过图像处理方法拟合得到一条直线(黑色

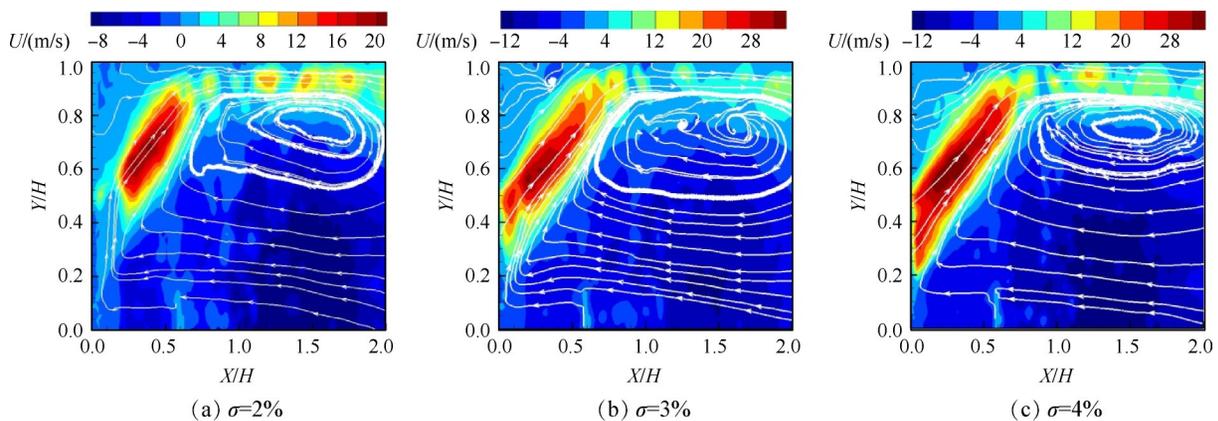


Fig. 3 Axial velocity field of combustor under various total pressure loss

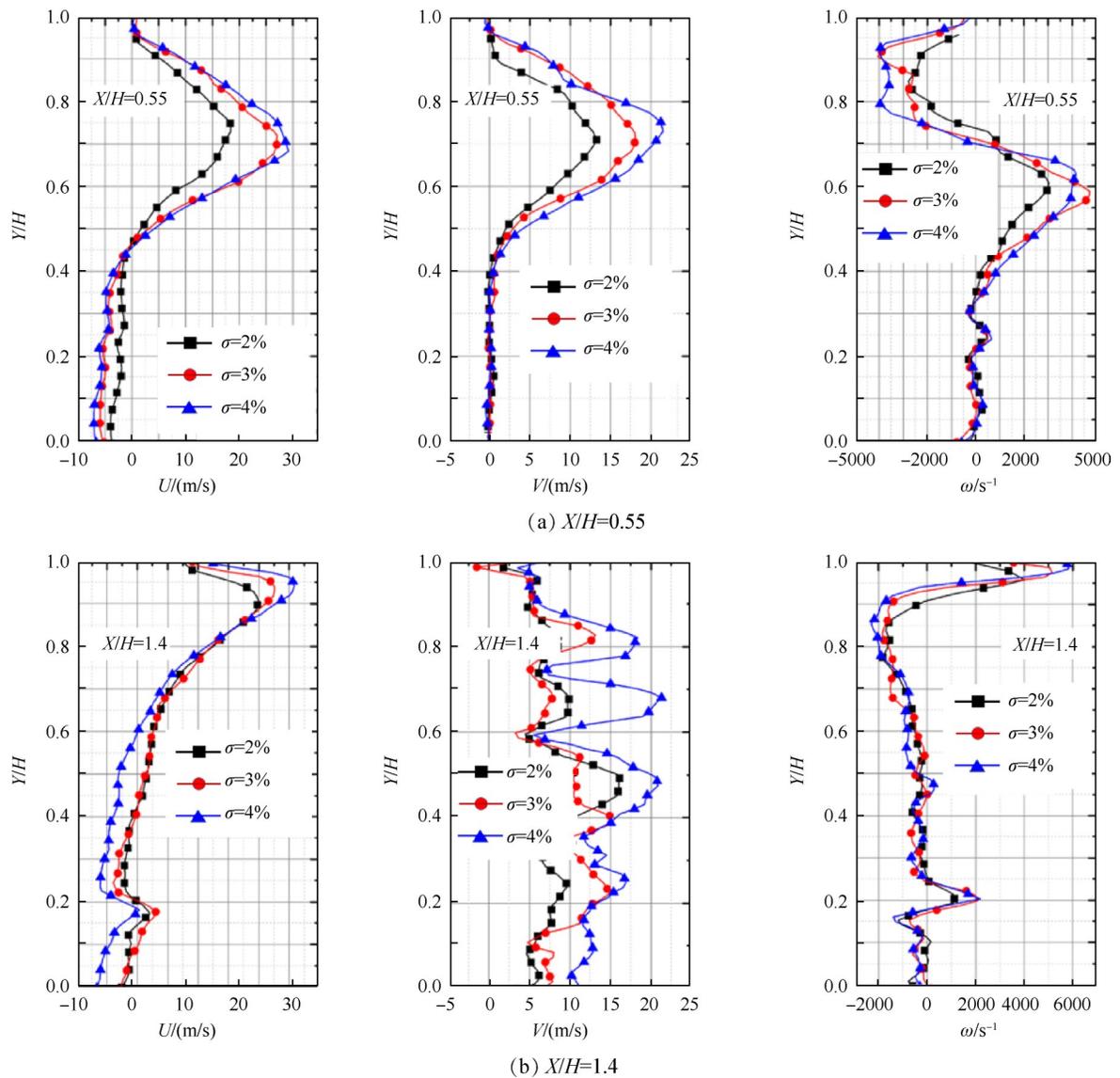


Fig. 4 Axial velocity and tangential velocity (left two images) and vorticity distribution at two different locations

虚线),且该直线满足回流区边界扩张段在该直线两侧分布面积相同,将该直线斜率的反正切值作为气流扩张段与中心 X 轴正方向(顺流方向)之间的夹角,即气流扩张半角 α ,研究总压损失与当量比对回流区前端扩张段扩张角的影响。如图5(b)所示,扩张半角随着总压损失的增大而减小,因为总压损失增大,燃烧室进口的轴向动量占总动量比值越大,高速气流的轴向动量挤压回流区导致扩张角减小;同时在当量比 <0.6 时,扩张半角随着当量比的增大而减小,这是由于高速燃油粒子在头部剪切层位置反应,高温燃气的加热作用提高了高速区轴向速度,导致高速气流碰壁位置延后,挤压回流区使得扩张角减小;在当量比 >0.6 时,回流区扩张半角随着当量比的增加而增大,因为此时主反应区在回流区内部,大量高温燃气的热膨胀效应挤压回流区向外扩张。但总

体来说,高速气流扩张角度随当量比变化较小,最大差值约为 1° ,随总压损失变化较大,最大差值约为 2° 。

实验中固定进口流量,调节燃油流量研究燃烧室中的火焰结构随当量比的变化。使用高速摄影加CH滤镜的方式(滤镜中心波长为430nm,带宽10nm)拍摄400帧瞬态火焰CH*基团发光灰度图像,其灰度使用 I_0 表示,取平均后使用最大亮度(I_{max})进行归一化伪色彩处理,得到特定工况下的CH基团光强分布云图。由于CH*基团通常存在于反应区,其发光强度是用来表征化学反应热释放率的重要标识,因此可以通过CH基团的高亮度区域的变化研究反应区结构和化学反应速度^[21-24]。通过后处理对比发现火焰结构可大体分为“V”型火焰、过渡火焰以及包络火焰三种类型。图6分别给出了3%总压损失下不同当量比

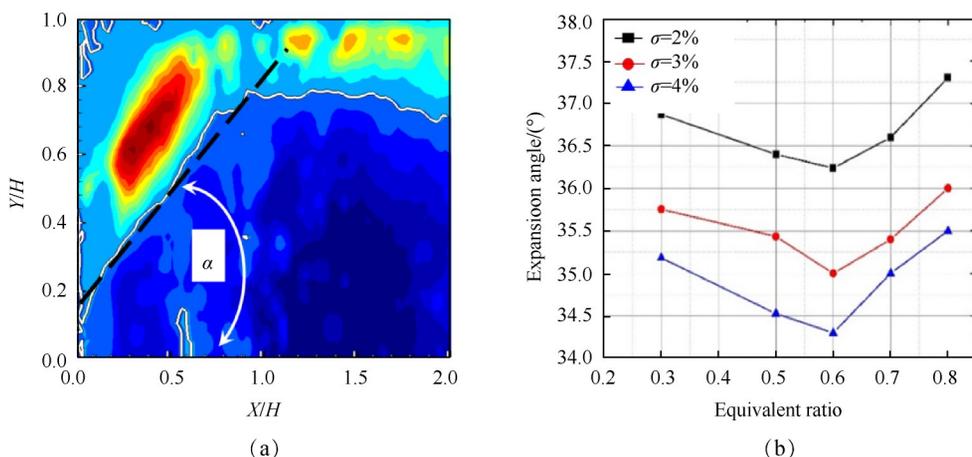


Fig. 5 Expansion angle of high speed region at different operation conditions

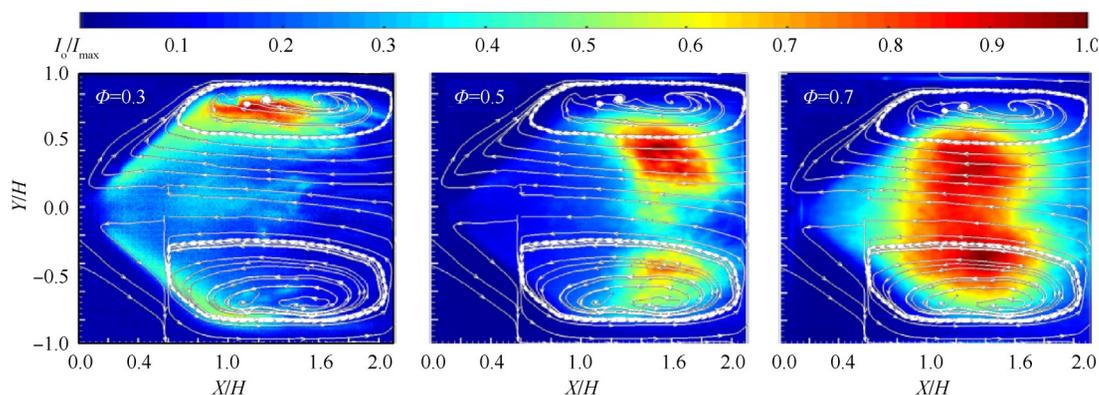


Fig. 6 Flame shape under different equivalent fuel-air ratio

时的三种反应区结构以及其中心回流涡的相对位置分布。当量比为0.3时反应区呈“V”型,强反应区处于高速气流碰壁位置以及回流涡附近,部分火焰由回流区与高速区之间的剪切层稳定;当量比为0.5时,强反应区存在于回流区内部的回流涡附近,剪切层内的反应强度减小,主反应区分别在回流区后部的上下回流涡内部,但回流区内并未完全进行高强度反应;当量比为0.7时,主反应区充满整个回流区内部,且连成一整个高强度区域。说明低当量比时火焰主要由高速区诱导生成的剪切层稳定,随着当量比提高,主反应区向后移动由回流涡稳定,当量比进一步提高,强反应区在回流区内部的面积进一步增加。

通过 Matlab 对单个工况下火焰灰度图的灰度进行累加后取平均值得到单个工况下的火焰发光总亮度,用于衡量燃烧室整体反应强度。图7给出了不同总压损失以及不同当量比下的火焰总体发光强度。观察发现,火焰形态在0.6当量比附近产生变化,火焰发光强度在包络火焰之前随当量比为线性增长规律;进入包络火焰范围后,其变化分布更加接近指数分布。反应强度随着总压损失的增大而增大,一方

面因为来流速度越大,燃烧室内的湍流强度增大,燃烧室内更强的剪切掺混作用提高了燃油与空气的混合,另一方面在当量比 >0.6 后,燃烧室整体油气比逐渐接近恰当比,反应物浓度增加对化学反应的促进作用迅速提高,导致火焰发光总强度的增加速率提升。

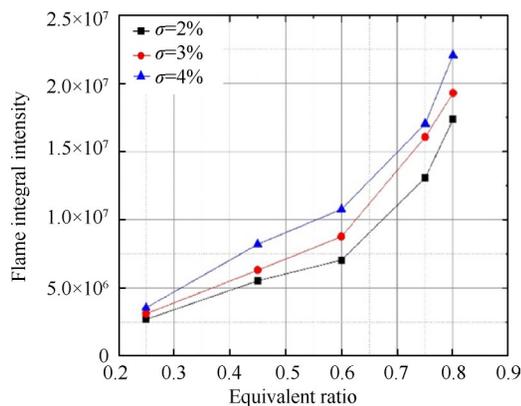


Fig. 7 Flame integral intensity with respect to equivalent ratio and total pressure loss

3.2 点火过程火焰动态发展

值班级扩散火焰作为高工况下三级旋流燃烧室的点火源,对于高工况下的火焰稳定与熄火后再点

火性能起决定性作用,值班扩扩散火焰点火过程特性是研究三级旋流燃烧室点火机理的基础之一。图8和图9给出了3%总压损失下点火当量比为0.35的点火动态过程。图8显示了点火过程中燃烧室总发光强度随着时间的变化规律,可以将火焰的发展过程分为四个典型阶段:即初始火核产生(Phase I)、火焰传播(Phase II)、大尺度熄火与再点火(Phase III)以及火焰稳定(Phase IV)。在划分Phase III与Phase IV的分界点时,计算稳定燃烧火焰平均发光亮度 \bar{I}_f ,取点火过程中火焰亮度在 \bar{I}_f 上下10%脉动阶段的第一个时刻点作为对应的分界点。图9分别显示了几个阶段内的典型火焰结构变化,高速摄影得到灰度图像后进行中值滤波以及归一化伪色彩处理,图中白色实线为该工况下回流区边界。初始火核在电火花附近产生后向下游运动,传播过程中火核加热周围混气,火核本身发光强度下降;火焰在中心回流涡稳定后,开始向上游传播,回传火焰具有明显的三维螺旋结构,回传过程中存在大尺度的火焰熄灭与再点燃过程,火焰熄灭后的再点燃是从回流涡附近开始;之后火焰再次从回流区后部向前传播,最终火焰稳定,其亮度也稳定在一个相对低的范围内。

图10分析了点火过程中三个典型阶段的持续时间随着总压损失与当量比的变化情况,根据亮度分布变化向上取整得到各个阶段的时长。

在Phase I阶段,随着总压损失的增大,火核生成时间延长。因为火核生成速度取决于火花点燃的球形混合物化学反应放热与火球表面向外导出热量的比值,流量越大,火核周围的对流速度越高,对流换热越强,火核增长速度减慢;随着当量比增加,火核

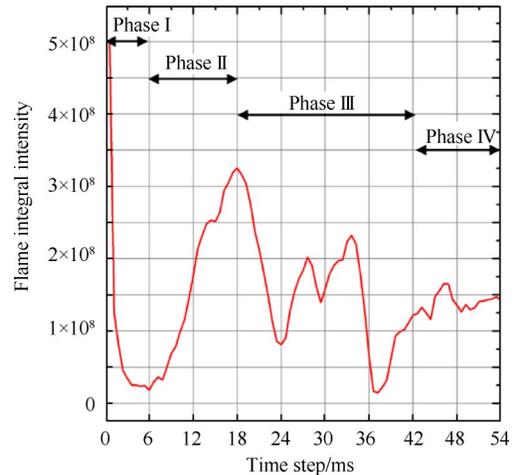


Fig. 8 Flame integral intensity distribution

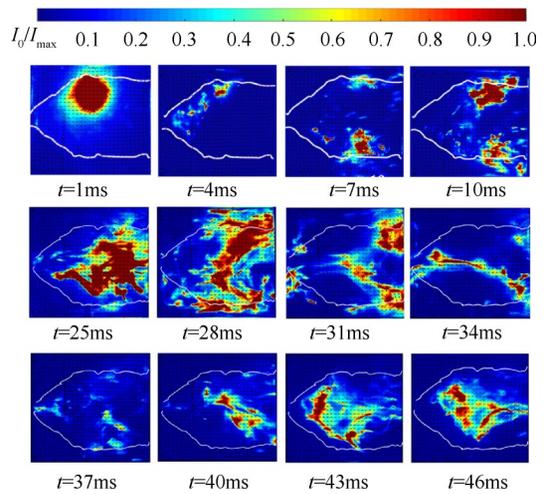


Fig. 9 Representative flame structures for several phases in ignition process

生成时间延长,因为燃油流量增大,燃油对点燃的火球冷却能力增强。

在Phase II阶段,随着总压损失增大,火焰传播阶段时间缩短,因为压损增大后,回流区内的回流速度

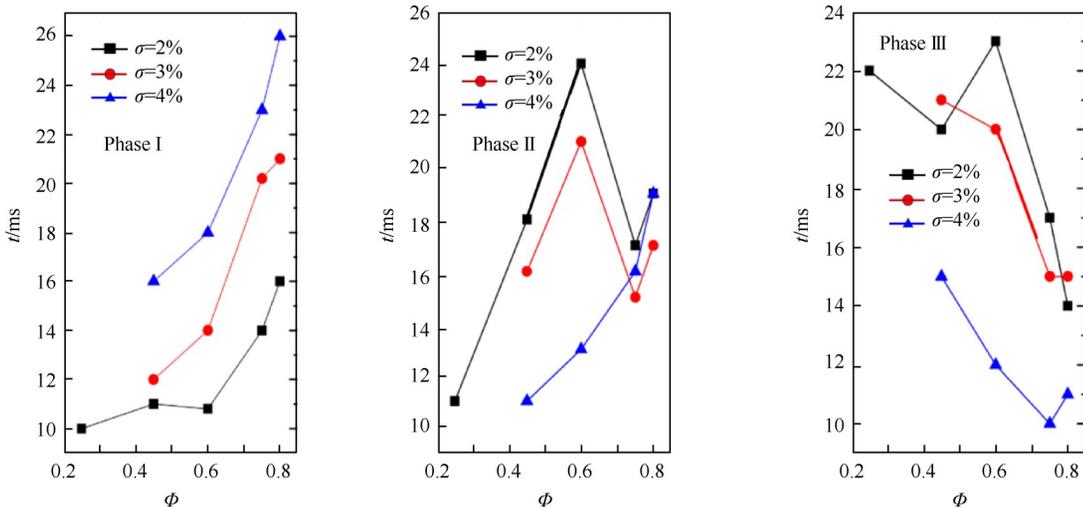


Fig. 10 Characteristic time for different ignition phases at different equivalence ratio

提高,已燃混气向新鲜混气侧的传播加快;随着当量比的增大,火焰传播时间在2%与3%总压损失下先延长后缩短再小幅增加,4%的压损下一直增大,因为在当量比增大到可以形成包络火焰的范围内,整个回流区内反应区域增大,火焰回传的“来源”增加,存在多个位置为未燃混气提供高温燃气使得火焰传播时间减小。

在Phase III阶段,随着总压损失增加,大尺度火焰熄灭与复燃时间缩短,因为提高总压损失增加了回流区内的最大回流速度,提高了熄火后高温燃气再次向未燃混气侧传播的能力使得其复燃时间缩短;随着当量比增大,火焰熄火与复燃时间缩短,因为燃油流量增大使得燃油分布在燃烧室内越发分散,同时离心喷嘴供油压力更高,燃油雾化与掺混性质得到了提高,调高了火焰复燃能力,同时油气分布改善使得火焰熄灭后新鲜混气的吸热自燃能力提高,因此火焰熄灭与再点火时间缩短。

4 结 论

通过本文研究,得到如下结论:

(1)总压损失对燃烧室内热态流场结构无影响,其主要改变具体的速度值大小;在头部高速射流区存在内、外剪切层,随着流动向下游发展,高速气流紧贴壁面流动。

(2)火焰结构随着当量比变化存在“V”型火焰、过渡火焰以及包络火焰三种形态,过渡当量比在0.6左右。

(3)热态回流区扩张段扩张角度随总压损失的增大而减小,最大差值约为 2° ;随着当量比先减小后增大,最大差值约为 1° 。

(4)点火过程中存在火焰的熄灭与复燃,复燃火焰从回流涡附近以三维螺旋方式回传;随总压损失的增大,火核生成时间延长,火焰传播时间缩短,熄火复燃时间缩短;随当量比增大,火核生成时间延长,火焰传播时间先延长后缩短,熄火复燃时间缩短。

参考文献

- [1] Mongia, Hukam. TAPS: A Fourth Generation Propulsion Combustor Technology for Low Emissions[C]. AIAA 2003-2657.
- [2] 张 弛, 林宇震, 徐华胜, 等. 民用航空发动机低排放燃烧室技术发展现状及水平[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 332-350.
- [3] 邓远灏, 马存祥, 郭 凯, 等. 贫油预混预蒸发燃烧室排放试验研究[J]. 推进技术, 2016, 37(4): 691-697. (DENG Yuan-hao, MA Cun-xiang, GUO Kai, et al. Experimental Investigation on Emission of Lean Premixed Pre-Evaporation Combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(4): 691-697.)
- [4] Wang S, Yang V, HSiao G, et al. Large-Eddy Simulations of Gas-Turbine Swirl Injector Flow Dynamics [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 583: 99-122.
- [5] Tachibana, Shigeru. Experimental and Numerical Investigation of Thermo-Acoustic Instability in a Liquid-Fuel Aero-Engine Combustor at Elevated Pressure: Validity of Large-Eddy Simulation of Spray Combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162: 2621-2637.
- [6] Huang Ying, Vigor Yang. Dynamics and Stability of Lean-Premixed Swirl-Stabilized Combustion [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, 35(4): 293-364.
- [7] Lazik W, Doerr T, Bake B. Low NO_x Combustor Development for the Engine 3Ecore Engine Demonstrator[R]. ISABE 2007-1190.
- [8] Temme J E, Allison P M, Driscoll J F. Combustion Instability of a Lean Premixed Prevaporized Gas Turbine Combustor Studied Using Phase-Averaged PIV [J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161: 958-970.
- [9] 李宇航, 张 弛, 王建臣, 等. 预燃级对TeLESS II燃烧室冒烟排放的影响[J]. 航空动力学报, 2018, 33(2): 2424-2433.
- [10] 肖荣洪, 林宇震, 张 弛. 预燃级旋流数对TeLESS II燃烧室贫油熄火性能影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(6): 1265-1272.
- [11] 傅江坤, 周建华, 郭志辉. 中心分级燃烧室预燃级的喷雾特性研究[J]. 推进技术, 2020, 41(6): 1-9. (FU Jiang-kun, ZHOU Jian-hua, GUO Zhi-hui. Experimental Investigation on Pilot Spray Characteristic of Internally-Staged Combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(6): 1-9.)
- [12] 丁国玉, 何小民, 江 平, 等. 套筒角度对三级旋流燃烧室燃烧性能的影响[J]. 推进技术, 2017, 38(2): 376-385. (DING Guo-yu, HE Xiao-min, JIANG Ping, et al. Effects of Flare Angle on Combustion Performance of a Triple Swirler Combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(2): 376-385.)
- [13] 丁国玉, 何小民, 赵自强, 等. 油气比及进口参数对三级旋流器燃烧室性能的影响[J]. 航空动力学报, 2015, 30(1): 53-58.
- [14] 丁国玉, 何小民, 朱一骁, 等. 旋向组合对小尺度三级旋流燃烧室性能的影响[J]. 推进技术, 2016, 37(11): 2097-2106. (DING Guo-yu, HE Xiao-min,

- ZHU Yi-xiao, et al. Effects of Rotating Direction Combination on Performance of a Triple Swirler Combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(11): 2097-2106.)
- [15] 蒋波, 赵自强, 何小民, 等. 内旋流器旋流数对三级旋流流场特性的影响[J]. 推进技术, 2016, 37(11): 2150-2156. (JIANG Bo, ZHAO Zi-qiang, HE Xiao-min, et al. Effects of Inner Swirl Number on Flow Characteristics of a Triple Swirler Combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(11): 2150-2156.)
- [16] 赵自强, 何小民, 丁国玉, 等. 外旋流器旋流数对三级旋流流场特性的影响[J]. 航空动力学报, 2017, 32(2): 306-313.
- [17] 赵自强, 何小民, 丁国玉, 等. 旋流数组合对三级旋流流场的影响[J]. 推进技术, 2016, 37(10): 1909-1915. (ZHAO Zi-qiang, HE Xiao-min, DING Guo-yu, et al. Effects of Swirl Number Combinations on Flow Characteristics of a Triple Swirler Combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(10): 1909-1915.)
- [18] 赵自强, 何小民, 丁国玉, 等. 旋流器流量分配对三级旋流流场特性的影响[J]. 推进技术, 2017, 38(1): 134-140. (ZHAO Zi-qiang, HE Xiao-min, DING Guo-yu, et al. Effects of Air Proportions on Flow Characteristics of Swirling Flow Generated by Triple-Swirlers [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(1): 134-140.)
- [19] 杨金虎, 刘存喜, 刘富强, 等. 分级燃烧室预燃级旋流组织对点熄火性能影响的试验研究[J]. 推进技术, 2019, 40(9): 2050-2059. (YANG Jin-hu, LIU Cun-xi, LIU Fu-qiang, et al. Experimental Investigation of Effects of Pilot Swirl Flow Organization on Ignition and LBO Performance for a Staged Combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(9): 2050-2059.)
- [20] 周瑜, 乐嘉陵, 陈柳君, 等. 轴向三级旋流燃烧室流场结构大涡模拟[J]. 航空动力学报, 2017, 32(4): 917-925.
- [21] Gaydon A G, Wolfhard H G. *Flames, Their Structure, Radiation and Temperature*[M]. London: Chapman and Hall, 1979.
- [22] Sadanandan R, Stöhr M, Meier W. Simultaneous OH-PLIF and PIV Measurements in a Gas Turbine Model Combustor[J]. *Applied Physics B*, 2008, 90: 609-618.
- [23] Smith G P, Luque J, Park C, et al. Low Pressure Flame Determinations of Rate Constants for OH* and CH* Chemiluminescence [J]. *Combustion and Flame*, 2002, 131: 59-69.
- [24] Weigand P, Meier W, Duan X R, et al. Investigations of Swirl Flames in a Gas Turbine Model Combustor: I. Flow Field, Structures, Temperature, and Species Distributions[J]. *Combustion and Flame*, 2006, 144: 205-224.

(编辑: 史亚红)