

预燃级对 TeLESS II 燃烧室冒烟排放的影响

李宇航¹, 张 弛^{1,2}, 王建臣¹, 王 波¹, 林宇震^{1,2}
(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院
航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;
2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 对不同预燃级结构的 TeLESS II 燃烧室冒烟排放性能进行了研究。通过燃气分析试验方法分别考察了预膜空气雾化喷嘴和离心喷射空气雾化喷嘴在预燃级单独工作和主预燃级同时工作时的冒烟排放。结果表明在预燃级单独工作时,预燃级结构对冒烟排放性能影响较大,而在主预燃级同时工作时影响较小。通过数值模拟对两种预燃级结构在预燃级单独工作时的冒烟排放差异进行了分析,发现预燃级结构改变了燃油在主燃区内的分布,两种方案在主燃区内生成的碳烟前驱物乙炔质量分数和分布位置存在明显差异,最终导致燃烧室出口冒烟排放不同。

关 键 词: TeLESS II 燃烧室; 预膜空气雾化; 离心喷射空气雾化; 冒烟排放; 碳烟数值模拟

中图分类号: V231.25 **文献标志码:** A

Effect of pilot strutures on smoke emissions in the TeLESS II combustor

LI Yuhang¹, ZHANG Chi^{1,2}, WANG Jianchen¹, WANG Bo¹, LIN Yuzhen^{1,2}
(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine
Aero-thermodynamics, School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: The effects of different pilot structures on smoke emissions of TeLESS II combustor were investigated. Smoke emissions of prefilming airblast atomizer and airblast simplex atomizer were tested through gas analysis method under pilot fueled mode and pilot-main fueled mode. The results indicated that the pilot structures had a great influence on the smoke emissions under pilot fueled mode, but less influence under pilot-main fueled mode. Numerical simulation was adopted to analyze different smoke emission performances with two pilot structures under pilot fueled mode. The simulation results show that the different pilot structures change the distribution of fuel in the main combustion zone, leading to significant differences in the mass fraction and distribution position of smoke precursor acetylene and different smoke emissions of combustor outlet.

Key words: TeLESS II combustor; prefilming airblast atomization; airblast simplex atomization; smoke emissions; soot numerical simulation.

民用航空发动机污染排放物包括氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)、未燃碳氢(UHC)和冒烟(smoke)。污染排放物不仅造成局部空气质量恶化,而且对全球气候变化的造成一定的影响。虽然航空发动机的排放只占全球燃烧污染排放的小部分,但是它具有排放地域和空域集中的特点^[1]。根据国际民航组织(ICAO)公布的民用航空发动机排放标准来看,对污染物排放要求日趋严格,从2014年开始,将执行CAEP/8(Committee on Aviation Environmental Protection/8)标准,不仅需要 NO_x 排放进一步降低,同时对固体颗粒物排放限制也更加严格。因此航空发动机的冒烟排放研究引起国内外学者的重视。

具有低排放潜力的贫油预混预蒸发(LPP)技术在航空发动机燃烧室设计领域内得到了广泛的重视^[2-3]。美国GE公司发展的第四代低污染燃烧室TAPS(twin annular premixing swirler)低排放燃烧室采用中心分级的方式实现LPP技术,相对于CAEP/6标准,其研制的TAPS1将 NO_x 排放降低52%,冒烟排放降低57.7%;TAPS2将 NO_x 排放降低60%^[4]。但TAPS的冒烟研究仅仅局限于工程取证方面,而气动热力场对冒烟的影响研究尚未公开。国内目前开展低排放燃烧室方面工作的单位有北京航空航天大学、工程热物理研究所、西北工业大学及南京航空航天大学等^[5-15]。其中北京航空航天大学发展了TeLESS(technology of low emission of stirred swirl)低排放中心分级燃烧室,发展的TeLESS I燃烧室的排放特性相比CAEP/6标准降低50%,并对其点火、熄火、燃烧不稳定性方面进行了综合研究^[5-9]。目前发展TeLESS II燃烧室,旨在进一步提高燃烧室综合性能,其排放性能的设计目标比CAEP/6标准降低60%。该方案的基本特征为:采用贫油燃烧技术,中心分级布局方式。中心预燃级由双级涡流器、套筒和离心喷嘴等组成;外围主燃级则采用环形预混段结构,在内、外环壁面和端壁面上开设若干直孔、斜孔,气流通过斜孔进入主燃级预混通道内形成旋流用于强化燃油蒸发和油气掺混,因此对该自主知识产权技术命名为搅拌式旋流低排放燃烧技术(technology of low emission of stirred swirl, TeLESS)。文献[14]研究了TeLESS II燃烧室点火性能,发现燃烧室主燃级叶片角度对燃油质量浓度分布影响较大,进而影响燃烧室常温常压工况下点火性能。Wang等^[15]进一步研究TeLESS II燃烧室套筒张角对

贫油熄火性能的影响,发现 35° 张角方案的熄火性能优于 15° 方案。王智勇等^[16]对TeLESS II的气态污染物和燃烧效率进行了系统的研究,但仍缺乏对燃烧室冒烟排放的探索。其他高校和研究所则对低排放燃烧室的流场和雾化进行了研究。综合国内研究来看,目前对于低排放中心分级燃烧室的冒烟性能的研究尚未开展。

目前燃烧室冒烟研究方法主要分为两类:数值模拟和试验测量。数值模拟的优势在于能够根据碳烟生成模型提供碳烟生成规律^[17-19],但是碳烟的形成过程和机理十分复杂,因此数值模拟存在一定的局限性。为了探究燃烧室冒烟性能,更多学者采用试验测量的方式来实现,其中光学诊断和燃气分析法为测量碳烟的主要手段^[20-25]。光学诊断法如荧光诱导炽光法则能够实现燃烧过程某一截面碳烟的质量浓度分布定量研究^[26],为碳烟模型提供有利的试验数据。但系统极为复杂,需要采用特定方法标定。燃气分析法侧重于燃烧室出口冒烟的定量测量,准确度高,适用评价燃烧室冒烟性能。国内王华芳等^[22]针对航空发动机单头部燃烧室出口冒烟性能采用燃气分析法进行定量研究,提供了可靠的冒烟数据。许全宏等^[23]通过采用三旋流器的头部结构使高温升燃烧室出口冒烟数降低至32。付镇柏等^[24]发现不同的喷嘴结构对进场工况的中心分级燃烧室冒烟性能影响较大,说明燃油雾化质量和燃油空间分布是影响燃烧室的因素之一。

综上所述,主燃区的气动热力特征对燃烧室的性能影响较大,而主燃区的气动热力特征是由主燃级和预燃级的旋流和燃油喷射共同导致的。燃烧室的冒烟排放性能是燃烧室的重要排放指标之一,不同的预燃级结构对主燃区的气动温度场有影响,从而影响燃烧室内污染物排放。目前对不同预燃级结构的冒烟特性研究尚未开展,因此研究预燃级结构对TeLESS II燃烧室冒烟排放性能对改善民用航空发动机排放水平至关重要。

本文的内容是保证相同的主燃级流动和燃油喷射方式,在相同工况下,通过燃气分析法对两种不同预燃级结构的燃烧室的出口冒烟排放性能进行研究,并采用CFD数值模拟的方法分析预燃级结构冒烟排放性能差异的原因。

1 研究对象及系统

1.1 TeLESS II 低排放燃烧头部结构

本文设计的两种头部方案,记为方案A和方

案 B。方案 A 的预燃级采用旋流杯结构,由离心喷嘴、双级径向旋流器、文氏管和套筒组成。燃油从离心喷嘴喷出,呈锥形喷射到文氏管壁面形成预膜状油雾,是典型的预膜空气雾化喷嘴^[25],再由两级径向旋流器内外两股空气使得油雾破碎,进入主燃区燃烧,如图 1(a)所示。方案 B 的预燃级采用离心喷嘴和二级轴向旋流器匹配,从离心喷嘴喷射的燃油直接形成锥形油雾和预燃级旋流空气掺混进入主燃区燃烧,该结构称为离心喷射空气雾化喷嘴,如图 1(b)所示。主燃级均采用轴向旋流器,叶片角度为 30°,主燃级燃油通过直射式喷嘴喷入预混段内,与通过主燃级的旋转气流进行掺混,在预混通道内进行预混预蒸发,最后进入主燃区燃烧。两个预燃级方案保证套筒出口的有效面积和旋流数相同。

1.2 冒烟试验安排

本文的主要研究两种预燃级结构对燃烧室冒

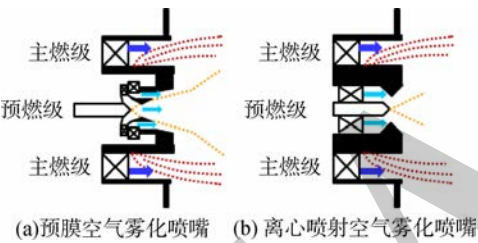


图 1 TeLESS II 燃烧室头部结构示意图

Fig. 1 Schematic of head of TeLESS II combustor

烟排放性能的影响,试验件为单头部燃烧室,火焰筒采用多斜孔冷却方式防止高温烧蚀,侧壁采用冲击发散冷却方式。采用燃气分析法对燃烧室出口冒烟进行测试,测试采样系统包括两个部分:高压试验系统和冒烟测试系统。

高压试验系统包括以下几部分:气源、气路调节阀门、加热系统(间接加热器)、前测试段、匀流段、试验段、后测试段、排气段、供油系统、采样系统、测试系统等,如图 2 所示。空气流量由标准孔板测量,在试验条件下测试精度为±1%。进入燃烧室的温度采用 K 型热电偶测量,压力采用压力传感器进行测试。燃油流量测量采用了哥氏力质量流量计,测试精度为±0.5%,考虑空气测量的精度,整个燃烧室油气比的不确定度为±1.4%。从采样耙子到冒烟测试台,燃气管道均采用了保温处理,保温到 433.15 K,以保证采集到的燃气以规定的温度进入冒烟测试台。

冒烟测试系统按照 ICAO 标准附件 16 进行的设计,原理如图 3 所示,与附件 16 中对于冒烟测试系统的原理一致。取样体积的测量使用湿法容积式容量计,测量精度在±2%,在容量计进口测量压力和温度,压力的测量精度在 0.2%,温度的测量精度在±2 K;样气的流量维持在(14±0.5) L/min,测量用的流量计为浮子流量计,其精度在±5%内;取样质量为每平方米有烟痕

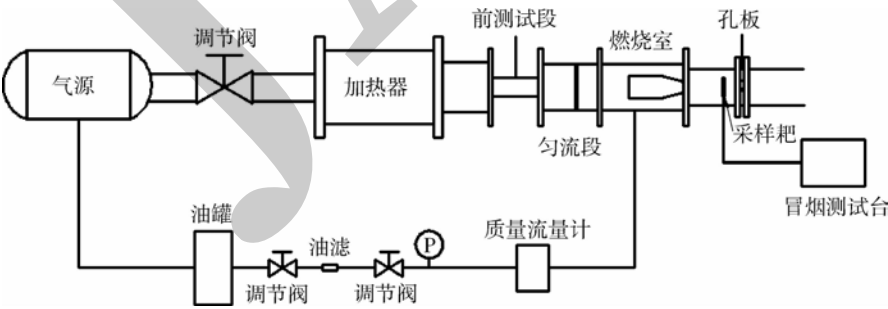


图 2 高压试验系统示意图

Fig. 2 Schematic of the high pressure test rig

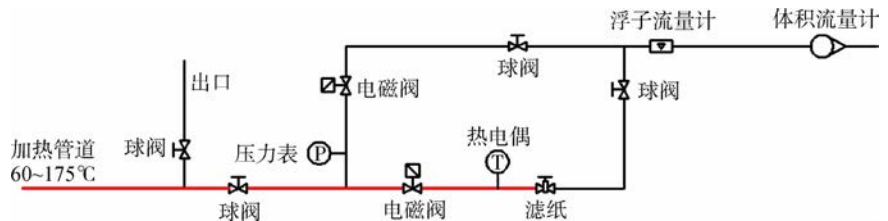


图 3 冒烟试验系统示意图

Fig. 3 Schematic of the smoke test rig

的滤纸上有 16.2 kg,根据每次试验测出的容量计进口测量压力和温度,可计算得到燃气的密度,根据燃气经过滤纸的面积,可以计算需要采集的燃气质量,进而可以得到燃气的体积流量。

对于反射率的测试采用的是 Photovolt Model 577 Reflectometer,该反射率计是美国漫反射 No. PH2.17/1977 标准里面推荐的反光白度测量仪器,仪器测量反射率的不确定度满足冒烟反射率测试仪的要求。

冒烟数的计算公式^[27]如下:

$$N_s = 100(1 - R_s/R_w) \tag{1}$$

式中 N_s 是冒烟数; R_w 是干净滤纸的全反射率; R_s 是测试冒烟之后的滤纸的反射率。

1.3 试验工况

为了探究中心分级燃烧室的冒烟性能,考虑到中心分级的工作方式,在小工况下预燃级单独工作,为扩散燃烧方式,保证火焰稳定。大工况主预燃级同时工作,降低了 NOx 的排放。将试验工况也分为两种,小工况和大工况,其具体试验参数见表 1。工况 1 和工况 2 是小工况状态,预燃级单独工作,保证进口温度和进口压力不变,改变预燃级油流量使预燃级当量比变化。工况 3 和工况 4 是大工况状态,主燃级和预燃级共同工作,保证进口温度和进口压力不变,同时保证燃烧总油气比不变,通过改变主预燃级燃油分配比例而调整主预燃级的局部当量比。分级比定义为预燃级燃油流量与总燃油流量之比,工况 3 的分级比 a 为 0.12,工况 4 的分级比为 0.08。 Φ_p 为预燃级当量比。分别对方案 A 和方案 B 在 4 个工况下进行试验,探究预燃级的结构对中心分级燃烧室冒烟性能的影响。

表 1 试验工况表				
Table 1 Test conditions				
工况	进口总温 T_3 /K	进口总压 p_3 /MPa	分级 比 a	预燃级 当量比 Φ_p
1	574	0.72	1	2.02
2	574	0.72	1	1.79
3	800	2.17	0.12	0.42
4	800	2.17	0.08	0.27

2 试验结果

2.1 小工况下预燃级结构对冒烟性能的影响

在小工况下,只有预燃级单独工作,即对应工

况 1 到工况 2,考察预燃级对中心分级燃烧室排气冒烟性能的影响,如图 4 所示。从图 4 可以看出方案 A 和方案 B 在预燃级单独工作时,两个方案的冒烟数均随着预燃级当量比的升高而增大,但方案 A 和方案 B 的冒烟排放性能差别较大。在预燃级当量比为 2.02 时,方案 A 的冒烟数为 9.2,方案 B 则为 3.1;预燃级当量比为 1.79,方案 A 的冒烟数为 8.0,方案 B 的冒烟数为 2.6。可以看出在预燃级单独工作时,在相同预燃级当量比工况下,预膜空气雾化喷嘴冒烟排放较离心喷射空气雾化喷嘴高。

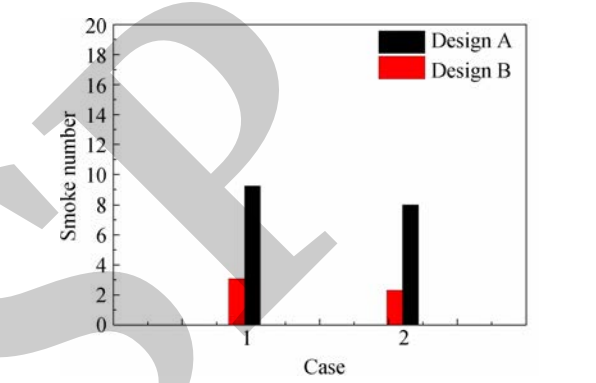


图 4 预燃级单独工作冒烟性能测试结果
($p_3=0.72\text{ MPa}$, $T_3=574\text{ K}$)

Fig. 4 Result of smoke emission test under the pilot fueled mode ($p_3=0.72\text{ MPa}$, $T_3=574\text{ K}$)

2.2 大工况下预燃级结构对冒烟性能的影响

在大工况下,主预燃级同时工作,即对应工况 3 和工况 4,考察预燃级结构对中心分级燃烧室排气冒烟性能的影响,如图 5 所示。

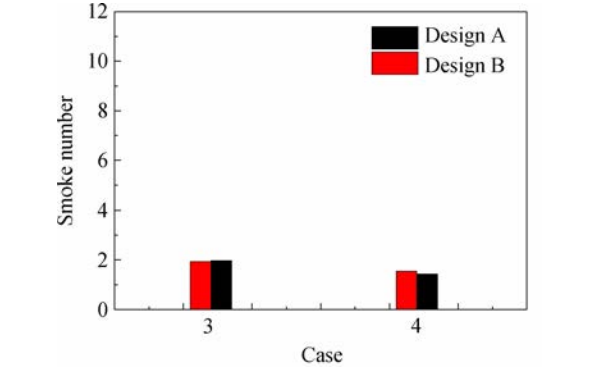


图 5 主预燃级共同工作冒烟性能测试结果
($p_3=2.17\text{ MPa}$, $T_3=800\text{ K}$)

Fig. 5 Result of smoke emission test under the pilot-main fueled mode
($p_3=2.17\text{ MPa}$, $T_3=800\text{ K}$)

在大工况下,主预燃级同时工作时,冒烟数较低。方案 A 和方案 B 的冒烟排放性能相差不大。由于中心分级燃烧室采用分级燃烧方式,使得主预燃级的当量比均处于贫油的状态,燃油分布均匀,避免了局部富油区的产生。而且主燃级燃油是通过直射式喷嘴多点喷射到环形通道中,与通过主燃级的旋转气流充分掺混、蒸发,形成预混预蒸发气体进入主燃区燃烧。可认为主燃级燃烧方式为贫油预混燃烧,防止了高温缺氧的环境,即使工况参数增大,反而能够降低冒烟的生成。

综合图 4 和图 5 可以看出预燃级结构主要对中心分级燃烧室在小工况下的冒烟性能影响较大,因此对该特性进行数值模拟,寻找两种方案形成冒烟的差异原因。

3 分析与讨论

从图 4 的规律可以看出,在预燃级单独工作时,预燃级结构对中心分级燃烧室排气冒烟影响较大,选取一个具有代表性的工况进行 CFD 计算,工况 1 下,方案 A 的冒烟性能较方案 B 差。采用数值模拟的方式定性分析在预燃级单独工作时,方案 A 和方案 B 的结构差异对中心分级燃烧室冒烟性能的影响。

本数值模拟旨在分析不同方案对燃油雾化和燃烧高温区域位置的影响。为了方便建模和网格划分,提高计算效率,保留燃烧室主要的气动特征,保证气流进出口尺寸和以及燃烧区尺寸与试验件一致,并保证头部有效面积及有效面积分配比例不变。采用 ICEM CFD 软件进行网格划分,全局采用非结构化四面体网格,并进行加密处理,网格总数为 530 万,网格质量在 0.3 以上。利用 Fluent 软件计算中心分级燃烧室燃烧场。该方案进口设为质量进口,来流方向垂直于进口面,出口设置为压力出口,设置工况与试验工况 1 的条件一致。湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型^[28],燃油喷射采用离散项设置,预燃级为扩散燃烧方式,因此采用离散项的稳态小火焰燃烧模型。机理采用一种简化的航空煤油 23 步化学反应机理^[29]创建火焰数据库,燃料类型为 $C_{12}H_{23}$ 。碳烟模型采用 Moss-Brookes 模型^[30],该模型考虑了碳烟的形成、表面增长和氧化,通过碳烟数量密度和碳烟质量分数来模拟燃烧碳烟生成。数值模拟方法采用压力耦合方程半隐式算法 (SIMPLE 算法) 求解器,压力方程采用标准格式离散,动量、湍流动能以及耗散率采用二阶迎风格式求解。

根据 Moss-Brookes 碳烟模型^[31],乙炔 (C_2H_2) 是碳烟形成的重要先驱物组分之一,碳烟初始生成速率 $\left(\frac{dw}{dt}\right)_{inception}$ 为

$$\left(\frac{dw}{dt}\right)_{inception} = c_1 M_p \left(\rho \frac{w_{C_2H_2}}{M_{C_2H_2}}\right) e^{-21100/T} \quad (2)$$

式中 w 为碳烟质量分数; t 为时间;下标 inception 表示初始生成; $M_p = 144 \text{ kg/kmol}$,为初始碳烟颗粒摩尔质量; ρ 为气体密度; $w_{C_2H_2}$ 为 C_2H_2 的质量分数; $M_{C_2H_2}$ 为 C_2H_2 的摩尔质量; T 为温度; $c_1 = 54 \text{ s}^{-1}$,为常数,表征碳烟成核速率因子。

碳烟的表面增长速率 $\left(\frac{dw}{dt}\right)_{growth}$ 为

$$\left(\frac{dw}{dt}\right)_{growth} = c_2 \left(\rho \frac{w_{C_2H_2}}{M_{C_2H_2}}\right) e^{-21100/T} \times \left[(\pi n)^{1/3} \left(\frac{6w}{\rho_{soot}}\right)^{2/3} \right] \quad (3)$$

式中下标 growth 表示碳烟增长; c_2 为常数; n 为碳烟数量密度; $\rho_{soot} = 2000 \text{ kg/m}^3$,为碳烟密度。

氧化模型考虑 OH 基为碳烟的氧化的主要基团,碳烟氧化速率 $\left(\frac{dw}{dt}\right)_{oxidation}$ 为

$$\left(\frac{dw}{dt}\right)_{oxidation} = -4.2325 \rho \frac{w_{OH}}{M_{OH}} \sqrt{T} (\pi n)^{1/3} \left(\frac{6w}{\rho_{soot}}\right)^{2/3} \quad (4)$$

式中下标 oxidation 表示氧化; w_{OH} 为 OH 基的质量分数; M_{OH} 为 OH 基的摩尔质量。

图 6 显示了小工况下沿轴向 (X 向) 截面上的密度加权平均碳烟质量浓度的数值模拟结果。图中原点位置对应预燃级套筒出口,在 $10 \sim 70 \text{ mm}$ 区间内,方案 A、方案 B 的碳烟质量浓度呈上升

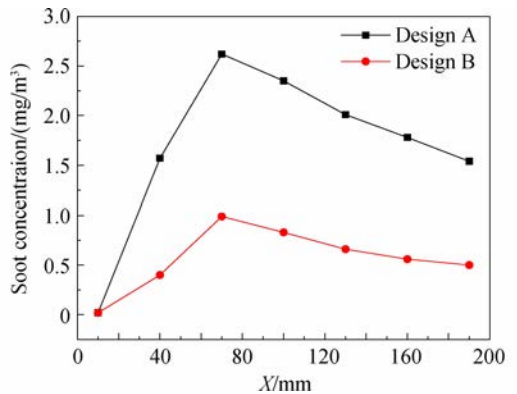


图 6 密度加权平均碳烟质量浓度沿轴向的变化 (工况 1)
Fig. 6 Variation of density-averaged soot concentration along axial direction (case 1)

趋势,说明在该区间内燃烧室碳烟生成速度高于碳烟氧化速度。在下游区域燃烧室的碳烟氧化速度高于生成速度,碳烟质量浓度逐渐降低。方案 A 在燃烧室内的碳烟质量浓度峰值为 2.6 mg/m^3 ,而方案 B 的碳烟质量浓度峰值为 1.0 mg/m^3 ,说明预燃级结构在小工况下对燃烧室碳烟生成影响较为明显,从而导致燃烧室出口冒烟排放产生差异。

图 7 显示了出口冒烟数的数值模拟结果和试验结果对比,黑色柱状图表示试验测量结果,红色表示数值模拟结果。统计燃烧室出口碳烟的密度加权平均质量浓度,方案 A 的质量浓度为 1.54 mg/m^3 ,方案 B 则为 0.50 mg/m^3 。参考航空发动机冒烟数和碳烟质量浓度之间的经验关系式^[27],计算得到工况 1 下方案 A 数值模拟冒烟数为 12.3,方案 B 为 4.9。相比试验结果,两个方案的数值模拟结果基本符合,定量结果存在一定偏差。考虑到试验过程中壁面冷却气的对燃烧室冒烟的氧化效应引起的误差,本文采用的数值模拟方法可以用于定性分析不同预燃级结构对燃烧室冒烟的影响规律。

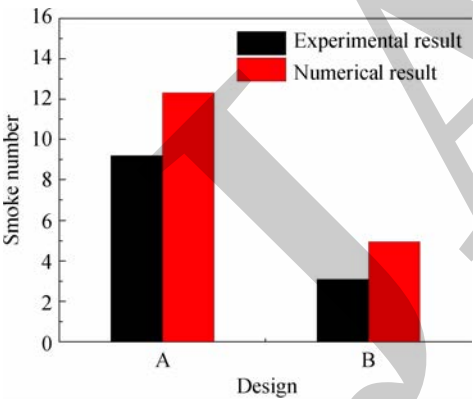


图 7 冒烟数值结果和实验结果对比(工况 1)

Fig. 7 Smoke number comparison between experimental result and numerical result (case1)

燃烧室冒烟排放性能与燃烧室气动热力特征密切相关,因此需要对燃烧室的速度分布和温度分布进行分析,用于评价预燃级结构对气动热力场的影响。图 8 为方案 A 和方案 B 在工况 1 条件下中心截面上的轴向速度沿径向的分布。径向距离从中心到火焰筒边界,轴向距离的原点($X=0\text{ mm}$)对应预燃级套筒出口。在距离燃烧室出口 5 mm 处($X=5\text{ mm}$),方案 A 和方案 B 在径向距离 $0\sim 30\text{ mm}$ 呈现不同的趋势。径向距离为 $0\sim 15\text{ mm}$ 区间,方案 A 的轴向速度高于方案 B,而径

向距离为 $15\sim 30\text{ mm}$ 区间相反,说明方案 A 预燃级出口速度张角小于方案 B,方案 A 的中心速度在 $X=5\text{ mm}$ 处仍然为正,直到下游 $X=15\text{ mm}$ 处为 0 m/s ;而 B 方案在 $X=5\text{ mm}$ 处中心速度为负,可以判断方案 B 的回流区滞止点更靠近上游,将燃烧热产物通过回流的方式引回至预燃级出口,增强了燃油的蒸发,有助于形成均匀的燃油蒸气分布。除此之外,回流的高温燃气与来流新鲜空气形成剪切层有助于燃油混合过程,从而形成较为均匀的燃油蒸气,避免局部富油区域出现。由于两种方案主燃级相同,径向距离大于 40 mm 的区域内,轴向速度特征无明显差异。随着流动向下游的发展,两方案的轴向速度特征趋势基本一致。

图 9 为工况 1 条件下燃烧室中心截面温度分布云图,图 9(a)为方案 A 的温度场,图 9(b)为方案 B 的温度场。可以看到不同的预燃级结构造成对燃烧室温度分布的影响,而碳烟生成与高温区密切相关。方案 A 的高温区分布更广,结合上述速度特性的分析,燃油的蒸发混合过程相比方案 B 远离预燃级出口,发生化学反应释热区域集中在回流区,回流区形成了高温缺氧的环境,是碳烟生成的主要场所。方案 B 的高温区则呈伞状分布,高温区域相对较小,且主要集中在离心喷嘴形成的油雾锥附近。

为了进一步探索预燃级结构对出口冒烟的影响,需要对燃烧室内的碳烟形成过程进行分析。碳烟生成可以简化为三个步骤:碳烟初始生成,表面增长和氧化。其中碳烟的初始生成和表面增长是促使碳烟生成过程,而碳烟的氧化过程则是消耗已生成的碳烟。

图 10 显示了工况 1 条件下中心截面上 C_2H_2 质量分数的分布情况,图 10(a)和图 10(b)分别为方案 A 和方案 B 的 C_2H_2 质量分数分布。 C_2H_2 的生成依赖于燃料的质量浓度^[29],方案 A 由于文氏管存在,燃油通过预膜破碎后形成较为明显的局部富油区域,碳烟前驱物的大量生成,为碳烟的产生提供了有利的条件。方案 A 相对方案 B 生成的 C_2H_2 组分分布更广,将二维流线图叠加到 C_2H_2 质量分布场中,方案 A 分布区域位于回流区和滞止点附近,该区域气流速度低,停留时间长,不利于局部富油区的扩散。 C_2H_2 的质量分数和碳烟初始生成速率相关,根据式(2),随着 C_2H_2 的质量分数增大,碳烟初始生成速率增大。而方案 B 的油雾从离心喷射空气雾化喷嘴喷出后直接成锥形射入主燃区内,中心截面上 C_2H_2

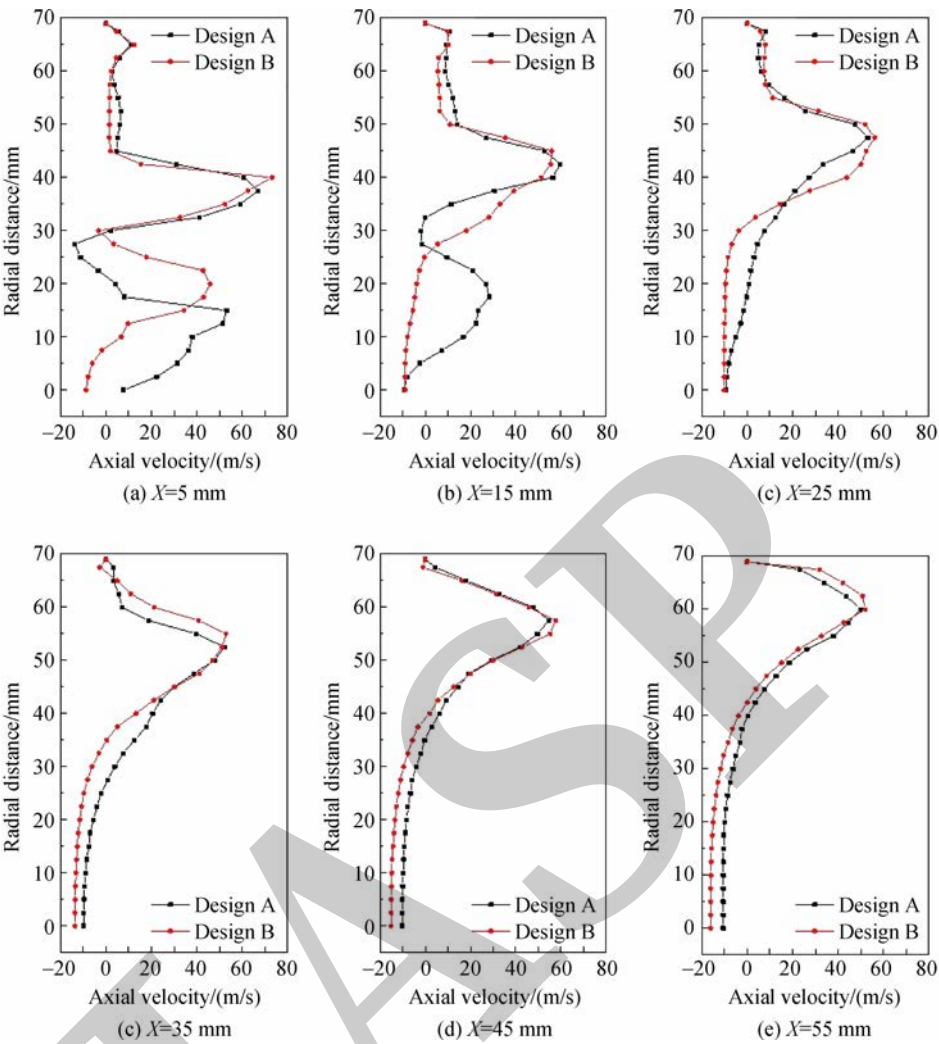


图 8 工况 1 下方案 A、B 中心截面轴向速度数值模拟结果

Fig. 8 Numerical simulation results of axial velocity on center plane of design A and design B under case 1

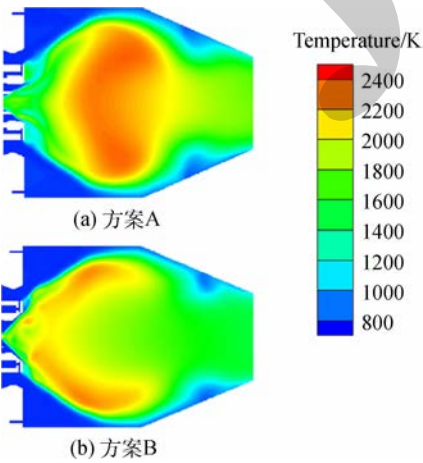


图 9 方案 A、B 中心截面温度分布(工况 1)

Fig. 9 Temperature distribution on center plane of design A and design B (case 1)

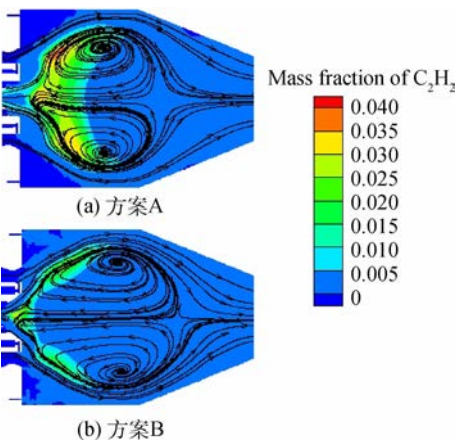


图 10 中心截面上 C_2H_2 质量分数数值结果(工况 1)

Fig. 10 Numerical simulation results of mass fraction of C_2H_2 on center plane (case1)

的分布呈锥形,分布区域狭小,集中在主预燃级气流的剪切层位置,该位置的气流和 C_2H_2 能够更均匀地混合进行氧化反应。而且生成的质量分数较方案 A 小,导致方案 B 和方案 A 的冒烟性能有明显差异。

图 11 显示了工况 1 条件下中心截面上碳烟表面增长速率的数值计算结果,可以看出碳烟表面增长速率与初始碳烟生成的前驱物 C_2H_2 的分布和质量浓度密切相关。结合式(3),碳烟表面增长速率与碳烟的初始生成速率呈正相关,方案 A

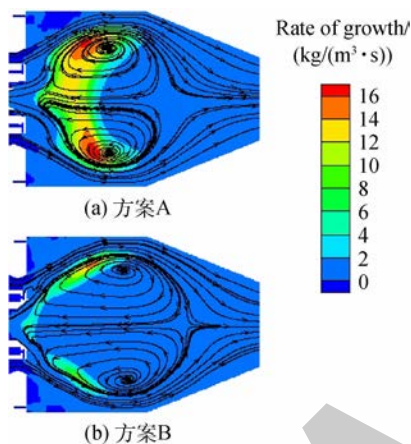


图 11 中心截面上碳烟表面增长速率数值结果(工况 1)
Fig. 11 Numerical simulation results of soot growth rate on center plane (case 1)

碳烟初始生成量大,初始生成速率高,引起碳烟表面增长速率相对方案 B 大,而且表面增长的峰值区域更靠近回流区内。方案 B 碳烟的增长主要集中在主预燃级剪切层内,和碳烟的初始生成前驱物的位置相同。因此从碳烟生成项可以发现方案 A 生成的碳烟质量更多,生成速率更快。

图 12 为工况 1 条件下中心截面上碳烟的氧化速率数值计算结果。方案 A 和方案 B 碳烟的氧化速率极值相同,氧化速率分布受到碳烟生成和增长过程的影响。

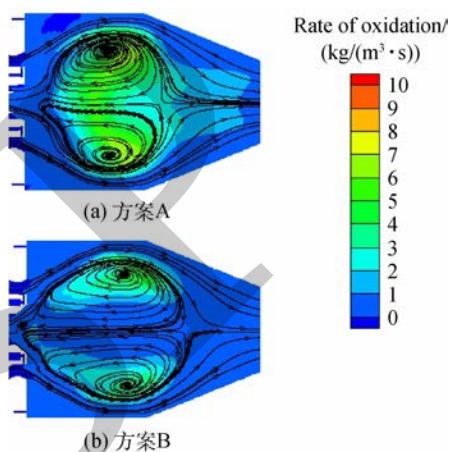


图 12 中心截面上碳烟氧化速率数值结果(工况 1)
Fig. 12 Numerical simulation results of soot oxidation rate on center plane (case 1)

4 结 论

本文在高压试验台上对不同预燃级结构的中心分级燃烧室冒烟性能进行研究,并利用 CFD 仿真分析研究了小工况时预燃级结构对中心分级燃烧室冒烟性能差异的原因,研究结果表明:

1) 中心分级燃烧室预燃级的结构对小工况下的冒烟性能影响较大,而对大工况的影响较小。在小工况下,方案 A 冒烟数约为方案 B 的 3 倍。

2) 预燃级结构对燃烧室预燃级出口的流场结构和燃烧室温度场有较大影响,进而使得主燃区内生成的碳烟前驱物 C_2H_2 质量分数和分布位置存在明显差异,导致方案 A 的初始碳烟生成质量大,而碳烟表面增长和氧化过程与碳烟初始生成量相关,因此方案 A 的冒烟排放较方案 B 高。

3) 本文对燃烧室出口冒烟性能进行了试验研究和数值模拟分析,但燃烧室内碳烟的形成过程比较复杂,需要更进一步探索燃烧室内气动热力特征,应用先进的激光测试设备,最终深入掌握燃烧室冒烟生成规律。

参考文献:

- [1] 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.
ZHANG Chi, LIN Yuzhen, XU Huasheng, et al. Development status and level of low emissions combustor technologies for civil aero-engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2): 332-350. (in Chinese)
- [2] 徐华胜,邓远灏,马存祥.民用航空发动机低排放燃烧室技术[J].航空科学技术,2012(4):5-10.
XU Huasheng, DENG Yuanhao, MA Cunxiang. Low emission combustor technology of civil aero engine[J]. Aeronautical Science and Technology, 2012(4): 5-10. (in Chinese)
- [3] 彭云晖,许全宏,张弛,等.我国大飞机发动机低污染燃烧室发展考虑[R].北京:大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会 2007 年学术年会,2007.
- [4] FOUST M, THOMSEN D, STICKLES R, et al. Development of the GE aviation low emissions TAPS combustor for next generation aircraft engines[R]. AIAA-2012-0936, 2012.
- [5] LI Lin, LIN Yuzhen, FU Zhenbo, et al. Emission character-

- istics of a model combustor for aero gas turbine application [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, 72: 235-248.
- [6] 付镇柏, 林宇震, 张弛, 等. 中心分级燃烧室预燃级燃烧性能实验[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(1): 46-52.
FU Zhenbo, LIN Yuzhen, ZHANG Chi, et al. Experiment of combustion performance of internally-staged combustor pilot stage[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(1): 46-52. (in Chinese)
- [7] 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.
FU Zhenbo, LIN Yuzhen, FU Qihui, et al. Effect of different step heights on ignition and blowout performance of internally-stage combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(5): 1062-1070. (in Chinese)
- [8] 邹博文, 许全宏, 曹文字, 等. 中心分级燃烧室耦合回流区贫油熄火机理[J]. *航空动力学报*, 2013, 28(8): 1759-1763.
ZOU Bowen, XU Quanhong, CAO Wenyu, et al. Lean blowout mechanism of coupled recirculation zone in concentric staged combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(8): 1759-1763. (in Chinese)
- [9] 秦皓, 丁志磊, 李海涛, 等. LESS 燃烧室非定常旋流流动[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(7): 1566-1575.
QIN Hao, DING Zhilei, LI Haitao, et al. Unsteady swirling flow in low emissions stirred swirls combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(7): 1566-1575. (in Chinese)
- [10] LIU C, LIU F, YANG J, et al. Experimental investigation of spray and combustion performances of a fuel-staged low emission combustor; Part I effects of main swirl angle [R]. ASME Paper GT2016-56530, 2016.
- [11] 刘强, 索建泰, 梁红侠, 等. 直混燃烧与 LPP 组合燃烧室数值研究[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(11): 2448-2454.
LIU Qiang, SUO Jianqin, LIANG Hongxia, et al. Numerical investigation of combustion of direct mixing combustion and LPP combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(11): 2448-2454. (in Chinese)
- [12] 颜应文, 徐榕, 邓远灏, 等. 贫油预混预蒸发低污染燃烧室头部流场研究[J]. *航空学报*, 2012, 33(6): 965-976.
YAN Yingwen, XU Rong, DENG Yuanhao, et al. Flow field study for head of lean premixed prevaporized low-emission combustor[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 33(6): 965-976. (in Chinese)
- [13] 颜应文, 李红红, 赵坚行, 等. 双环预混旋流低污染燃烧室数值研究[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(9): 1923-1929.
YAN Yingwen, LI Honghong, ZHAO Jianxing, et al. Numerical study of low emissions for twin annular premixing swirler combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(9): 1923-1929. (in Chinese)
- [14] WANG B, ZHANG C, LIN Y, et al. Influence of main swirler vane angle on the ignition performance of TeLESS-II combustor[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, 139(1): 011501.1-011501.8.
- [15] WANG B, ZHANG C, HUI X, et al. Influence of sleeve angle on the LBO performance of TeLESS-II combustor [R]. AIAA-2016-4693, 2016.
- [16] 王智勇, 王波, 韩啸, 等. TeLESS II 低排放燃烧室预燃级设计对排放的影响[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(7): 1561-1568.
WANG Zhiyong, WANG Bo, HAN Xiao, et al. Effect of pilot design in the TeLESS II low emission combustor on emission[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(7): 1561-1568. (in Chinese)
- [17] TAN J Y, BONATESTA F, NG H K, et al. Developments in computational fluid dynamics modelling of gasoline direct injection engine combustion and soot emission with chemical kinetic modelling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 107: 936-959.
- [18] CHOO K H, LEE S, DENNEY R K, et al. A semi-empirical model to predict aircraft soot emission in rich zone of RQL Combustor[R]. ASME Paper GT2015-43659, 2015.
- [19] 王力军, 杨海峰, 孙远伟, 等. 某重型燃气轮机碳烟生成和排放研究[J]. *燃气轮机技术*, 2014(3): 19-25.
WANG Lijun, YANG Haifeng, SUN Yuanwei, et al. Study on formation and exhaust of soot for a heavy duty gas turbine[J]. *Gas Turbine Technology*, 2014(3): 19-25. (in Chinese)
- [20] PECK J, LISCINSKY D S, YU Z, et al. Characterization of aviation soot emissions with a high-pressure gasturbine combustor rig[R]. ASME Paper 2014-GT-25226, 2014.
- [21] GEIGLE K P, ZERBS J, KÖHLER M, et al. Experimental analysis of soot formation and oxidation in a gas turbine model combustor using laser diagnostics[R]. ASME Paper GT2011-45611, 2011.
- [22] 王华芳, 刘高恩, 林宇震. 高压燃烧室的冒烟测量[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2001, 14(3): 34-37.
WANG Huafang, LIU Gaoen, LIN Yuzhen. Smoke measurement in high pressure combustor[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2001, 14(3): 34-37. (in Chinese)
- [23] 许全宏, 林宇震, 刘高恩, 等. 航空发动机高温升燃烧室贫油熄火及冒烟性能研究[J]. *航空动力学报*, 2005, 20(4): 636-640.
XU Quanhong, LIN Yuzhen, LIU Gaoen, et al. Research on the high-temperature rise combustor lean blow-out and smoke emission characteristics[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2005, 20(4): 636-640. (in Chinese)
- [24] 付镇柏, 林宇震, 张弛, 等. 中心分级燃烧室进场工况燃油分级方式试验研究[J]. *推进技术*, 2014, 35(1): 77-86.
FU Zhenbo, LIN Yuzhen, ZHANG Chi, et al. Experimental investigation on fuel-staging mode of internally-staged combustor under approach condition[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(1): 77-86. (in Chinese)
- [25] LEFEBVRE A H. Gas turbine combustion[M]. London: Taylor and Francis Group, 1998.
- [26] 郑亮. 用激光诱导炽光法研究燃烧过程中的碳烟生成特性

[D]. 北京:清华大学,2014.

ZHENG Liang. Research on soot formation characteristics in combustion process using laser induced incandescence [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese)

[27] MARTINI B. Development and assessment of a soot emissions model for aircraft gas turbine engines[D]. Massachusetts, US; Massachusetts Institute of Technology, 2008.

[28] 邓远灏, 颜应文, 朱嘉伟, 等. LPP 低污染燃烧室两相喷雾燃烧数值研究[J]. 推进技术, 2013, 34(3): 353-361.

DENG Yuanhao, YAN Yingwen, ZHU Jiawei, et al. Numerical investigation of two phase spray combustion performance for LPP low-emission combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(3): 353-361. (in Chinese)

[29] PENKO P, KUNDU K, SIOW Y, et al. A kinetic mechanism for calculation of pollutant species in Jet-A combustion[R]. Las Vegas, US: Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, 2000.

[30] BROOKES S J, MOSS J B. Predictions of soot and thermal radiation properties in confined turbulent jet diffusion flames[J]. Combustion and Flame, 1999, 116(4): 486-503.

[31] BASHIRNEZHAD K, MOGHIMAN M, ZAHMATKESH I. Studies on soot formation and combustion in turbulent spray flames: modeling and experimental measurement[J]. Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering: International English Edition, 2007, 26(3): 45-54.

(编辑:陈 越)